

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh vertikálního separátoru páry a přehřívače páry

pro jadernou elektrárnu MIR 1200

Proposal of Vertical Moisture Separator and Reheater

for NPP MIR 1200

Student:

Bc. Veronika Hegerová

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2013

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Veronika Hegerová**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh vertikálního separátoru a přehříváče páry
pro jadernou elektrárnu MIR 1200
Proposal of Vertical Moisture Separator and Reheater
for NPP MIR 1200**

Zásady pro vypracování:

Zpracujte projekční návrh vertikálního separátoru a přehříváče páry pro jadernou elektrárnu s tlakovodním jaderným reaktorem MIR 1200. Proveďte tepelný, hydraulický a pevnostní výpočet. Navrhněte optimální tvar žaluziového separátoru páry na základě teorie podobnosti. Na základě analýzy navrhněte výsledné řešení.

Zadané hodnoty: množství přehříváné páry 1500 kg/s; tlak a teplota páry před přehříváčem 0,8 MPa/174 °C; požadovaná suchost páry 0,99; množství topné páry 200 kg/s; tlak a teplota topné páry 7 MPa/288 °C.

Seznam doporučené odborné literatury:

HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03190-X.

MÁTAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně, 2001. ISBN 80-214-2028-6.

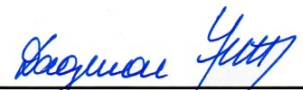
HEZOUČKÝ, František. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**


Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry





doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě18.5.2013.....

.....Hegerová'.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 18.5.2013

Hegerová

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Veronika Hegerová

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Na Opuce 88E, Hradec Králové 9, 500 09

Poděkování

Ráda bych poděkovala panu prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc. za poskytnuté materiály a cenné rady při zpracování této diplomové práce.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HEGEROVÁ, V. *Návrh separátoru a přehříváče páry pro jadernou elektrárnu MIR1200: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2013, 64 s. Vedoucí práce: Kolat, P.

Diplomová práce se zabývá návrhem separátoru a přehříváku páry na základě zadaných hodnot. První část je věnována popisu bloku jaderné elektrárny, především se zaměřením na průběh páry v sekundárním okruhu. Z důvodu její značné vlhkosti na vstupu do nízkotlakého dílu turbíny je zde zakomponován separátor a přehřívák páry. Dle specifických požadavků jednotlivých elektráren jsou tato zařízení modifikována, a proto se věnuji pouze jejich základnímu dělení a principům. Dále uvádím několik příkladů realizovaných v jaderných elektrárnách. Druhá část této diplomové práce je tvořena výpočtem. Pro návrh optimálního zařízení vycházím z tepelného výpočtu separátoru a přehříváku páry. Následně je proveden i pevnostní výpočet jednotlivých částí. V závěru zhodnocuji vypočtené hodnoty a popisují navrhované zařízení.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

HEGEROVÁ, V. *Proposal of Vertical Moisture Separator and Reheater for NPP MIR1200: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2013, 64 s. Thesis head: Kolat, P.

This thesis is concerned with the design of steam separator and associated re-heater. The document is based on predefined set of parameters. The first part of this document is devoted to a description of a nuclear power plant, mainly focusing on process of steam management in the secondary circuit. Because of moisture content in the steam that enters a low-pressure section of a turbine the separator and re-heater are incorporated. Since each nuclear power station has its specific requirements, these two devices must be customised. Therefore I only focus on basic grouping of these devices by type and principle. Further, I am providing additional examples that have been used at another nuclear power station. The second part of this thesis document contains applicable calculations. To be able to correctly size (optimise) both devices, I have used heat transfer calculations. Subsequently pressure and strength calculations of individual components are conducted. In conclusion I summarise my calculated results and describe the proposed installation.

Obsah

1	Úvod.....	17
2	Popis jaderné elektrárny.....	18
2.1	Primární kruh	18
2.1.1	Štěpná reakce	18
2.1.2	Tlakovodní reaktor.....	19
2.2	Sekundární okruh	20
2.2.1	Typy parních turbín	20
3	Expanze vlhké páry.....	22
4	Separátory a přehříváče páry	23
4.1	Separátory	24
4.1.1	Způsoby odstranění vlhkosti páry	24
4.1.2	Typy vnějších separátorů	24
4.1.3	Porovnání separátorů	26
4.1.4	Požadavky na vnější separátory páry	26
4.2	Přehřívák páry.....	27
4.3	Kombinované provedení separátoru a přehříváku páry	27
4.3.1	JE Dukovany.....	27
4.3.2	JE Biblis.....	28
4.3.3	JE Grohnde	29
4.4	Protierozní ochrana	30
4.5	Výhody a nevýhody separátorů a přehříváků páry	30
5	Výpočet.....	31
5.1	Návrh separátoru	31
5.1.1	Parametry separátoru	31
5.1.2	Hydraulický výpočet žaluziového separátoru.....	33
5.1.3	Přepočet navrhovaného zařízení dle Kutateladzeho kritéria.....	34
Návrh vertikálního separátoru a přehříváče páry pro jadernou elektrárnu MIR 1200		7

5.1.4	Účinnost navrženého separátoru	36
5.2	Návrh přehříváku páry	37
5.2.1	Rychlost proudění	37
5.2.2	Druh proudění na straně přehříváné páry	39
5.2.3	Přestup tepla.....	40
5.2.4	Prostup tepla	42
5.2.5	Střední logaritmický spád	43
5.2.6	Velikost teplosměnné plochy vnějšího povrchu trubek	44
5.3	Pevnostní kontrola.....	46
5.3.1	Pevnostní kontrola válcového pláště SPP s vnitřním přetlakem.....	46
5.3.2	Pevnostní kontrola dna nádoby	50
5.3.3	Pevnostní kontrola vrchlíkového víka	53
5.3.4	Pevnostní kontrola trubky přehříváku s vnitřním přetlakem	55
5.3.5	Pevnostní kontrola rozváděcí trubky	58
6	Závěr	61
7	Použitá literatura	62
8	Seznam příloh	64

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Jednotka	Popis
c	m	je přídavek k základní výpočtové tloušťce
C	-	parametr charakterizující maximální zatížení
c_t	-	konstanta dle uspořádání trubek
c_1	m	přídavek na výrobní nepřesnosti a zápornou výrobní úchylku tloušťky
c_2	m	přídavek na korozi
d_1	m	vnitřní průměr trubky
d_2	m	vnější průměr trubky
d_3	m	vnější průměr rozváděcí trubky
d_h	m	hydraulický průměr
d_n	m	vnitřní průměr zanesené trubky
D_{SPP}	m	vnější průměr pláště SPP
e	m	šířka kazety
H	m	hloubka klenutí
h_c	m	celková výška kazet
i_2	$J \cdot kg^{-1}$	entalpie páry na výstupu ze separátoru
i_3	$J \cdot kg^{-1}$	entalpie páry na výstupu ze SPP
i_{p1}	$J \cdot kg^{-1}$	entalpie páry na vstupu do separátoru
k	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	prostup tepla
k_r	-	teor. hodnota koeficientu rezervní plochy

Ku	-	Kutateladzeho kritérium
l	m	výška kazety přehříváku
l_t	m	teoretická délka trubky
\dot{m}_k	$kg \cdot s^{-1}$	hmotnostní tok kondenzátu ze separátoru
\dot{m}_{p1}	$kg \cdot s^{-1}$	hmotnostní tok páry na vstupu do S
\dot{m}_{p2}	$kg \cdot s^{-1}$	hmotnostní tok páry na výstupu ze S
n	-	exponent dle uspořádání trubek
m	-	počet kazet separátoru
n_{tr}	-	celkový počet trubek v přehříváku
$n_{tr,\check{s}}$	-	počet trubek na šíři kazety
Nu	-	střední hodnota Nusseltova kritéria přehřívané páry
p	MPa	výpočtový přetlak
p_1	Pa	tlak páry před separátorem
p_2	Pa	tlak páry na výstupu ze separátoru
Pr	-	Prandtlovo kritérium přehřívané páry
p_t	MPa	výpočtový přetlak trubky
$p_{t,z}$	MPa	zkušební přetlak trubky
p_z	MPa	zkušební přetlak
Q	W	tepelný výkon přehříváku
r	m	rozvinutá šířka žaluzie
R	m	vnější poloměr vrchlíku
Re_o	MPa	mez kluzu oceli 11 123.5

Re	-	hodnota Reynoldsova kritéria přehřívání páry
Re _{tr}	MPa	mez kluzu oceli 15 230.7
Re _{tr,z}	MPa	zkušební mez kluzu oceli 15 230.7
Re _z	MPa	zkušební mez kluzu oceli 11 123.5
Rm	MPa	mez pevnosti oceli 11 123.5
S ₁	m	rozteč trubek
S ₂	m	rozteč trubek
S _{ČT}	m ²	čelní plocha jedné trubky
S _{ČT,C}	m ²	čelní plocha trubek v 6ti kazetách
S _D	m	nejmenší tloušťka stěny dna pro provozní podmínky
S _{D,z}	m	zkušební výpočtová tloušťka stěny dna
S _{dno}	m	provedená tloušťka dna
S _{dno,z}	m	nejmenší tloušťka dna při tlakové zkoušce
S ₀₁	m	základní výpočtová tloušťka stěny pláště
S ₀₂	m	základní výpočtová tloušťka stěny dna
S ₀₃	m	základní výpočtová tloušťka stěny víka
S ₀₄	m	základní výpočtová tloušťka stěny trubky přehříváku
S ₀₅	m	základní výpočtová tloušťka stěny trubky přehříváku
S _{OP}	m ²	obsah obdélníkového průřezu kanálu
S _p	m	provedená tloušťka stěny

$S_{p,z}$	m	nejmenší tloušťka stěny při tlakové zkoušce
S_{pl}	m	nejmenší tloušťka stěny pro provozní podmínky
$S_{pl,z}$	m	zkušební výpočtová tloušťka stěny pláště
S_{RT}	m	provedená tloušťka stěny rozváděcí trubky
$S_{RT,z}$	m	zkušební výpočtová tloušťka stěny trubky
S_{sk}	m^2	skutečná velikost teplosměnné plochy navrženého přehříváku
S_t	m^2	teoretická velikost teplosměnné plochy
S_t	m	provedená tloušťka stěny trubky
$S_{tr,z}$	m	zkušební výpočtová tloušťka stěny trubky
S_{trubky}	m	provedená tloušťka stěny trubky přehříváku
S_v	m	nejmenší tloušťka vrchlíkového víka pro provozní podmínky
$S_{v,z}$	m	zkušební výpočtová tloušťka stěny víka
$S_{víko}$	m	provedená tloušťka víka
$S_{víko,z}$	m	nejmenší tloušťka víka při tlakové zkoušce
$S_{žs}$	m^2	výpočtová průtočná plocha žaluziovým separátorem
$S_{žs,K}$	m^2	výpočtová průtočná plocha žaluziovým separátorem dle Kut. kritéria

$S_{zs,sk}$	m^2	navržená průtočná plocha žaluziovým separátorem
t	m	rozteč žaluzií
t_{p1}	$^{\circ}C$	teplota páry na vstupu do separátoru
t_{p2}	$^{\circ}C$	teplota páry na výstupu ze separátoru
t_{p3}	$^{\circ}C$	teplota páry na výstupu ze SPP
$t_{stř}$	$^{\circ}C$	střední teplota páry přehřívané páry
t_{TP}	$^{\circ}C$	teplota topné páry
v	-	součinitel svarového spoje
v_t	-	součinitel svarového spoje
$W_{stř,PP}$	$m \cdot s^{-1}$	střední rychlost přehřívané páry
$W_{dop,K}$	$m \cdot s^{-1}$	doporučená rychlost dle Kut. kritéria
W_{dov}	$m \cdot s^{-1}$	dovolená rychlost páry
W_{krit}	$m \cdot s^{-1}$	kritická rychlost páry
$W_{krit,K}$	-	kritická rychlost dle Kutateladzeho kritéria
W_{TP}	$m \cdot s^{-1}$	střední rychlost topné páry v trubkách přehříváku
x_1	-	suchost páry na vstupu do separátoru
x_2	-	suchost páry na výstupu ze separátoru
x_B	-	součinitel bezpečnosti
x_z	-	zkušební součinitel bezpečnosti pro válcovanou ocel
z	-	počet trubek v jedné kazetě

z_1	-	počet kazet v přihříváku
α	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla na straně přihříváné páry
$\alpha_{pp,stř}$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	střední součinitel přestupu tepla na straně přihříváné páry
α_{TP}	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla na straně TP
β	-	opravný součinitel
β_s	-	skořepinový součinitel
Δp_z	Pa	tlaková ztráta v separátoru
Δt_1	°C	střední (logaritmický)spád teplot
ε_1	-	součinitel vyjadřující změnu přestupu tepla v první řadě
ε_2	-	součinitel vyjadřující změnu přestupu tepla v druhé řadě
ε_s	-	součinitel vlivu poměrných roztečí na přestup tepla
η_{sep}	-	účinnost separátoru
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	tepelná vodivost přihříváné páry
λ_n	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	tepelná vodivost nánosu $CaCO_3$
λ_o	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	tepelná vodivost oceli
ξ	-	koefficient odporu žaluzie
π	-	Ludolfovo číslo
ρ'	$kg \cdot m^{-3}$	hustota syté vody
ρ''	$kg \cdot m^{-3}$	hustota syté páry

ρ_1	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	hustota mokré páry na vstupu do S
σ	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	povrchové napětí
σ_{dov}	MPa	dovolené namáhání dle meze kluzu
$\sigma_{\text{dov,P}}$	MPa	dovolené namáhání dle meze pevnosti v tahu
$\sigma_{\text{dov,tr}}$	MPa	dovolené namáhání trubky
$\sigma_{\text{dov,T-z}}$	MPa	zkušební dovolené namáhání trubky separátoru
$\sigma_{\text{dov,z}}$	MPa	zkušební dovolené namáhání SPP
v	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	měrný objem syté páry
$v_{\text{P vstup}}$	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	měrný objem přehřívané páry na vstupu do přehříváku
$v_{\text{P výstup}}$	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	měrný objem přehřívané páry na výstupu z přehříváku
$v_{\text{stř,PP}}$	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	střední měrný objem přehřívané páry
$v_{\text{K,TP}}$	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	měrný objem kondenzátu TP
v_{TP}	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	měrný objem topné páry
φ	°	polovina úhlu zakřivení

Zkratky

JE jaderná elektrárna

MIR.1200 Modernized International Reaktor

NT nízkotlaký díl turbíny

PP přehřívání páry

PT parní turbína

SPP separátor-přehřívák páry

TP topná pára

VT vysokotlaký díl turbíny

S separátor

P přehřívák

PV pevnostní výpočet

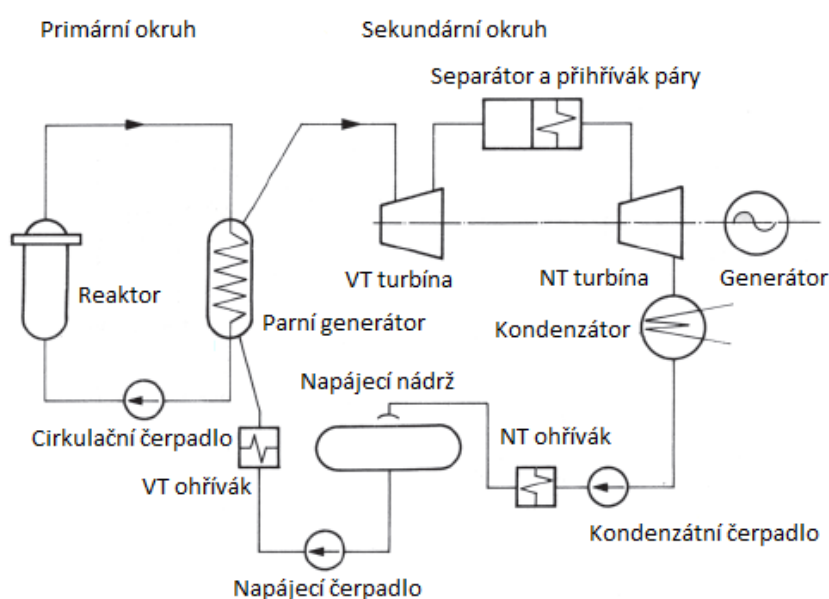
1 Úvod

Momentálně jednou z nejdiskutovanější záležitostí v oblasti energetiky je dostavba 3. a 4. bloku jaderné elektrárny Temelín. Zvažované i stávající bloky mají tlakovodní reaktor. Nedílnou součástí každého sekundárního okruhu je separátor a přehřívák páry. V separátoru dochází k odloučení kondenzátu, který vzniká při expanzi páry ve vysokotlakém dílu turbíny. Následně je v přehříváku páry ohřáta pomocí odběrové páry.

Návrh tohoto zařízení je předmětem mé diplomové práce. Parametry navrhovaného separátoru a přehříváku páry vycházejí z výkonové nabídky česko-ruského konsorcia Škoda JS, Atomstrojexport a Open Hidropress a konstrukční nabídky firmy Westinghouse. Západní koncepce SPP je použita již v řadě německých jaderných elektráren jako např. JE Grohnde s výkonem 1300MW.

U vertikální konstrukce SPP je odvod kondenzátu pro ohřátou páru, která kondenzuje v potrubí, značně ulehčen díky účinkům gravitace. U horizontální konstrukce dochází k mnohým poruchám vlivem zpětného toku páry. Dalším výhodám vertikálního provedení tohoto zařízení se budu více věnovat v následujících kapitolách.

V jaderné elektrárně dochází k transformaci energie tepelné na elektrickou stejným způsobem, jako je tomu v klasických uhelných elektrárnách. Rozdíl je pouze ve způsobu získávání tepelné energie. Proto se ani tepelná schémata klasické a jaderné elektrárny příliš neliší viz Obrázek 1-1. [19]



Obrázek 1-1 Zjednodušené tepelné schéma jaderné elektrárny [7]

2 Popis jaderné elektrárny

2.1 Primární kruh

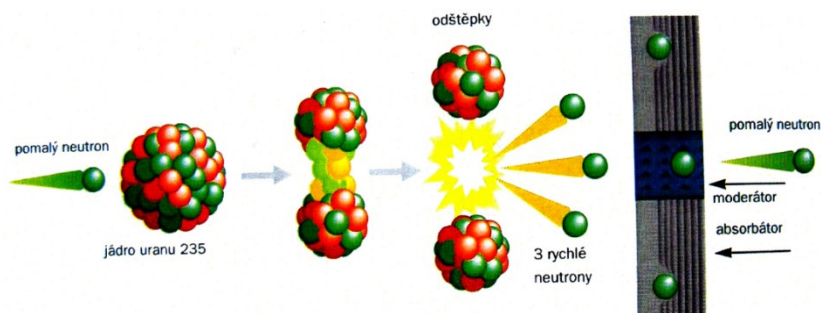
Koncepce elektrárny česko-ruského konsorcia MIR. 1200 je stejná, jako již u stávajících bloků JE Temelín. Každý blok je tvořen dvěma okruhy – primárním a sekundárním. K přeměně jaderné energie na tepelnou dochází v aktivní zóně reaktoru. Odvod tepla z aktivní zóny je realizován chladivem proudícím v teplé větvi primárního potrubí do parogenerátoru. Pomocí teplosměnných ploch, které jsou v něm umístěné, je teplo předáno vodě sekundárního okruhu. Odděluje tedy od sebe primární okruh, který obsahuje radionuklidy a neradioaktivní sekundární okruh. Z parogenerátoru se voda vrací pomocí hlavních cirkulačních čerpadel studenými větvemi zpět do reaktoru. [1]

Celý primární okruh lze definovat jako tlakovou nádobu zaplněnou chladivem. Objem chladiva je závislý na teplotních změnách okruhu a následně dochází i ke změnám tlaku v celém primárním okruhu. K regulaci tlaku slouží systém kompenzace, který se skládá z kompenzátoru objemu, barbotážní nádrže a pojišťovacích ventilů. Při značném snížení tlaku hrozí vznik páry v aktivní zóně reaktoru a naopak při jeho velkém zvýšení by mohlo dojít k porušení celistvosti primárního okruhu. [1]

2.1.1 Štěpná reakce

V tlakovodním reaktoru dochází k vývinu tepla pomocí řízené řetězové štěpné reakce, ke které dochází při interakci tepelných neutronů s jádry těžkých prvků (uran-235, plutonium-239). Dochází k rozštěpení těchto jader na štěpné produkty a vzniknou přitom další 2-3 rychlé neutrony, které mohou štěpit další jádra těžkých kovů. Při výrobě energie potřebujeme toto štěpení řídit pomocí atomů, které zpomalují neutrony. K tomu se využívají tzv. moderátory. Jedná se o jádra lehkých prvků např. vodíku, deuteria, berilia a uhlíku (obrázek 2-1).

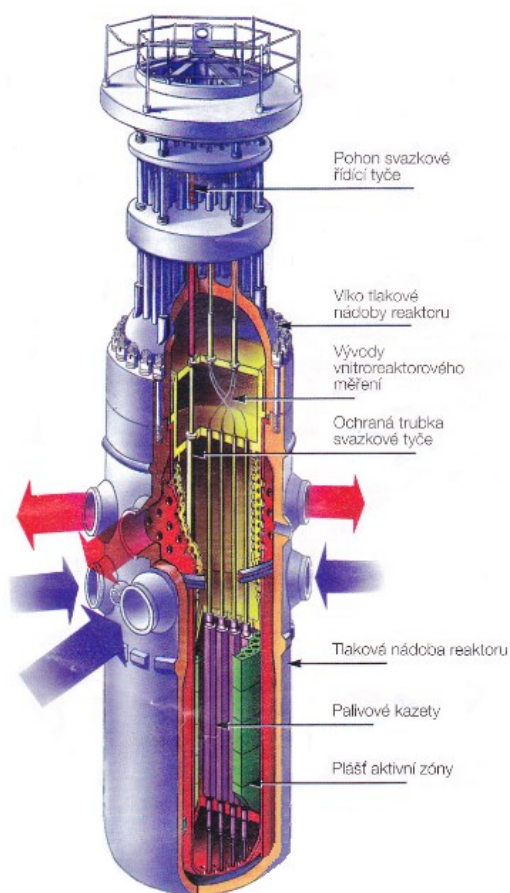
Dosavadní bloky JE Temelín využívají jako moderátor tzv. lehkou vodu (H_2O). Počet neutronů se v aktivní zóně reguluje zvyšováním nebo snižováním koncentrace kyseliny borité v chladivu. [2]



Obrázek 2-1 Štěpná reakce

2.1.2 Tlakovodní reaktor

Stávající i plánované bloky jaderné elektrárny Temelín disponují nejpoužívanějšími reaktory na světě. Jedná se o tlakovodní reaktory – PWR (Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor) viz Obrázek 2-2. Palivem obohacený uran je ve formě tabletek oxidu uraničitého, které jsou uloženy v palivových tyčích. Jejich průměr je přibližně 9mm a jsou chráněny povlakem na bázi zirkonia, který zajišťuje předání tepla z paliva chladivu. Zároveň slouží jako ochrana před propuštěním radioaktivních štěpných produktů. Svazky proutků tvoří kazety, a ty se pak vkládají do reaktoru. Kampaně na výměnu paliva bývají v rozmezí 1 až 1,5roku a nahrazuje se přibližně 1/3 paliva. Moderátorem a chladivem je obyčejná voda, která proudí pod vysokým tlakem o teplotě přibližně 300°C. Pro regulaci výkonu reaktoru je používán absorbátor, který se stejně jako palivo vkládá ve formě tyčí. Potřebného výkonu se dosahuje výškou jejich vytažení nebo zasunutí. Jedním z ochranných prvků reaktoru jsou havarijní tyče s vyšším obsahem absorbátoru. Jejich zasunutím se v případě potřeby zastaví výkon reaktoru. [3]



Obrázek 2-2 Tlakovodní reaktor

2.2 Sekundární okruh

Zdrojem páry pro sekundární okruh jsou parogenerátory, z nichž je pára odváděna parovody do vysokotlakého dílu turbíny (VT). Zde předá přibližně 40% své energie. Dochází k poklesu tlaku, teploty a tím ke zvýšení vlhkosti páry. Proto je pára odvedena do separátorů-přehříváčů páry (SPP). V nich dochází k odloučení vlhkosti pracovního média a k dalšímu ohřevu nad mez sytosti pomocí páry odebrané z odběru před vstupem do vysokotlakého dílu turbíny. [2]

Z SPP pára pokračuje do nízkotlakých dílů turbíny (NT) a následně do kondenzátorů. V těchto výměnících dochází vlivem odvedení kondenzačního tepla do chladicí vody ke snížení tlaku přibližně na 4 kPa. Kondenzát je pomocí nízkotlaké a vysokotlaké regenerace ohříván a poté pomocí čerpadel dopravován zpět do parogenerátoru. [1]

Kinetická energie rotoru turbíny se mění na elektrickou energii v generátoru, jehož rotor je pevně spojen s rotorem turbíny. Jeho součástí je budící vinutí, pomocí kterého vzniká ve vinutích statoru generátoru elektrický proud. [1]

2.2.1 Typy parních turbín

Parní turbíny na přehřátou páru

Turbíny na přehřátou páru jsou vhodné především pro sekundární okruh plynem chlazených reaktorů a terciální okruh rychlých, sodíkem chlazených reaktorů. Disponují vyššími vstupními stavy páry, tudíž i vyšší teplotou a tlakem, než je tomu u turbín na sytou páru. Další jejich výhodou je, že mají vyšší termodynamickou účinnost, větší zpracovatelný rozdíl entalpií, a tím danou menší spotřebu páry při stejném výkonu. [4]

Parní turbíny na sytou páru

Jedná se o nejrozšířenější typ parních turbín v sekundárním okruhu elektráren s tlakovodním reaktorem. Bude součástí i dostavovaných bloků JE Temelín, ať už zakázku získá kterýkoliv ze tří uchazečů. K expanzi syté páry dochází v oblasti mokré páry a snižuje se tím její suchost. Vlhkost páry při expanzi by se měla pohybovat do 13-14%, protože s každým procentem vlhkosti navíc dochází k poklesu termodynamické účinnosti příslušného stupně přibližně o 0,87%. Z tohoto důvodu se mezi první vysokotlaký díl a druhý nízkotlaký díl turbíny zařazuje separátor vlhkosti. Nejvýhodnější je kombinovaná forma separátoru a přehříváku páry. Vlhkost páry na výstupu ze separátoru bývá kolem 1% a následně vstupuje do přehříváku. K další expanzi dochází v nízkotlakém dílu turbíny. Celý proces je znázorněn

v diagramu 2-1[4]. Více se k procesu separace vlhkosti páry a jejího ohřevu budu věnovat v kapitole č. 4.1.

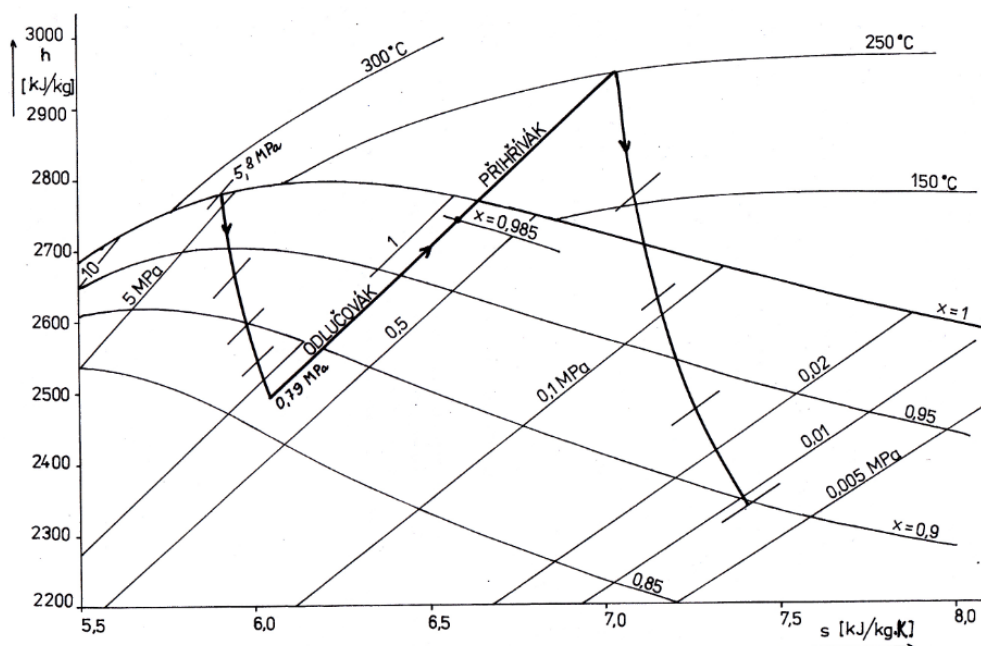


Diagram 2-1 Expanze páry v SPP

Začátek expanze syté páry probíhá jako expanze nasycené páry bez vlhkosti a dochází k jejímu podchlazení (teplota při další expanzi je nižší, než odpovídá rovnovážnému stavu). Během tohoto procesu dochází k neustálému shlukování molekul, dokud nedojde k dosažení suchosti x nazývané Wilsonova linie. Průběh těchto křivek je přibližně totožný čarám s konstantní suchostí. [4]

Oblast, ve které dochází k primární kondenzaci, se nazývá Wilsonova zóna. Suchost páry se zde pohybuje pod mezní křivkou a nabývá hodnot $x=0,96$ až $x=0,98$. Obecně platí, že čím větší bude rychlost expanze, tím později dojde k primární kondenzaci, viz Diagram 2-2. [4] Více se tomuto zajímavému jevu budu věnovat v následující v 3. kapitole.

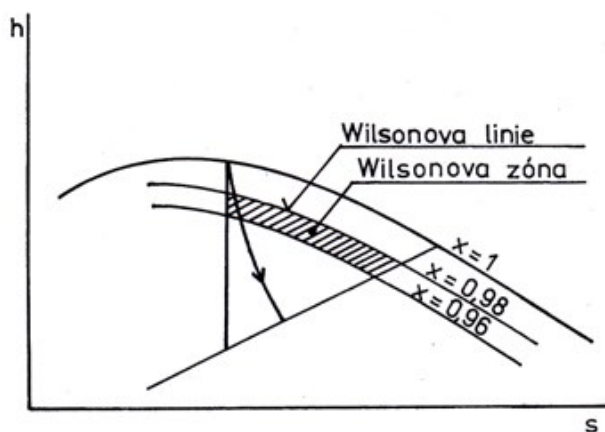


Diagram 2-2 Wilsonova linie

3 Expanze vlhké páry

Jak jsem již zmiňovala v předchozích kapitolách, vlhká pára a její expanze způsobuje řadu problémů. Jedná se o dvojfázové médium, směs plynné a kapalně fáze jedné látky.

Pokud dochází k expanzi páry z jednofázové oblasti dostatečně rychle, tak při přechodu přes křivku nasycení do určitého tlaku nenastává kondenzace a pára se mi stává podchlazenou. Při podchlazování dochází k nepřetržitému vytváření zárodků molekul, které následně přerůstají v kondenzační jádra a dochází ke kondenzaci. Jedná se o tzv. metastabilní stav. Až po uplynutí určité chvíle, a při stanovených podmínkách systému, přechází v rovnovážný stav. [5]

Proces kondenzace začíná při určité vlhkosti v oblasti pod čarou nasycení. Hodnota vlhkosti páry, při které dochází k expanzi, závisí na rychlosti spádu entalpie a je zobrazována pomocí Wilsonovy křivky v Diagram 2-2. [5]

Pro porovnání procesu expanze v rovnovážném a metastabilním stavu se využívá p-v a T-p diagramů. V Diagram 3-1 je znázorněn p-v diagram. Na něm křivky CB' a CB zobrazují rovnovážné procesy a procesy s podchlazením za čarou nasycení (od bodu C). Nedochází zde k oddělení odpovídající části výparného tepla. Toto je důvod, proč je teplota rovnoměrné expanze vyšší než při procesu s podchlazenou párou. [5]

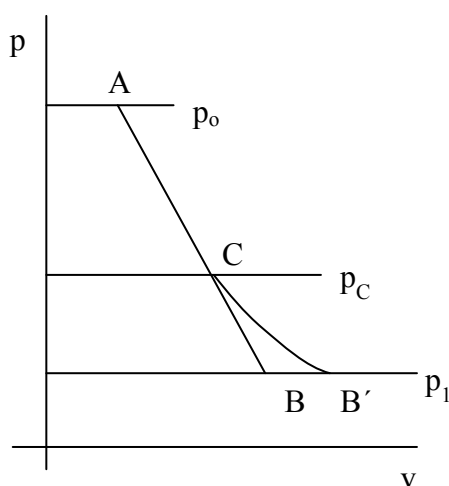


Diagram 3-1 p-v

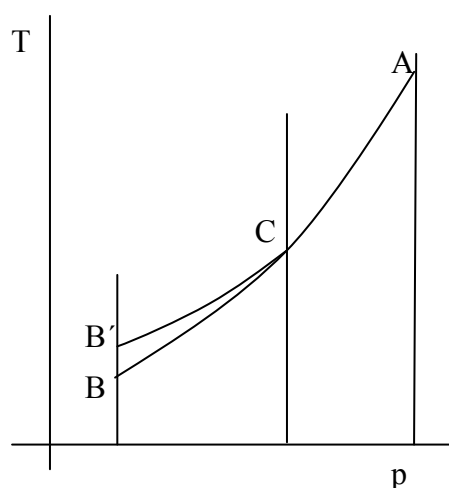


Diagram 3-2 T-s

Ze základních termodynamických podmínek vyplývá, že se entalpie a entropie mokré páry rovná součtu entalpií a entropií vody a páry. Separace je vratný děj, pokud je entalpie i entropie konstantní. Za těchto podmínek je práce vykonaná mokrou párou, rovna součtu prací vody a páry za separaci při nezměněném počátečním a koncovém tlaku. To je důvod, proč je účinnost ideálního cyklu závislá na změny vratnosti procesů v turbíně při zapojení separátorů. Hodnota nevratnosti je závislá na tlaku v separátoru. Pokud by byl počáteční tlak před turbínou roven tlaku v separátoru, pracovala by turbína se stejnou účinností s i bez separátoru. [5]

4 Separátory a přehříváče páry

Jaderné elektrárny pracující na sytou páru, mají vždy SPP. Ve většině případů je separátor a přehřívák umístěn v jednom tělese válcového tvaru. Mokrá pára vycházející z vysokotlaké části turbíny vstupuje do systému separátorových komor v nejnižší části SPP. Zde se vlhkost usazuje na povrchu desek. Pára pokračuje do vrchní části separátoru a zbývající vodní kapky se oddělují pomocí speciálních sít a žaluzií. Rychlost páry v separátoru se pohybuje mezi 5 až 15m/s, a proto je ve většině případů velikost tohoto zařízení poměrně velká. Před nízkotlakým dílem turbíny jsou v SPP umístěné zachytné ventily, které zabráňují zpětnému roztočení turbíny v případě náhlého odlehčení. Vlivem této ochrany vznikají další ztráty. [5]

Pára, která se pohybuje co nejbližší mezní křivce sytosti, se přehřívá párou z neregulovaného odběru. Přehříváky jsou uspořádány do trubkových svazků, ve kterých kondenzuje odběrová pára. Venkovní povrch trubek může být hladký nebo žebrovaný. Trubkové svazky mají dostatečně velký dynamický odpor, který zaručuje rovnoměrný průtok přehřívané páry. Výstup z PP je pouze jedním hrdlem.

Materiál trubkových svazků bývá CuNi či nerezavějící ocel. Délka trubek bývá malá a jsou náchylné na korozi. Nebezpečí koroze vzniká především v oblasti dosušování páry, kde je zvýšená koncentrace iontů chlóru, který reaguje s kyslíkem. Tento problém vzniká i u austenitických ocelí. [5]

Vysoké parní rychlosti při najíždění mohou vést k vibracím a poškození SPP.

4.1 Separátory

Separátory páry se používají k odstranění kapiček vody z páry, které mají větší setrvačnou hmotnost než pára. Kapky se pohybují po jiných drahách a jinými rychlostmi, než pro které byly navrženy tvary lopatek. Dochází tím k brždění a erozi především obvodových částí lopatek, kam se vlivem odstředivé síly dostává většina kapiček. Vlivem eroze dochází i ke korozi.

Odlučivost separátoru závisí především na tlaku, vstupní vlhkosti a rychlosti mokré páry. Též se odvíjí dle jeho konstrukce. Se stoupajícím tlakem klesá účinnost. Průměrně lze dosáhnout v oblasti tlaků 10-15 MPa účinnost separace 95-97 %. Vstupní vlhkost mokré páry do separátoru musí být větší než 6 %, protože pod tuto hranici odlučivost silně klesá. [20]

4.1.1 Způsoby odstranění vlhkosti páry [4]

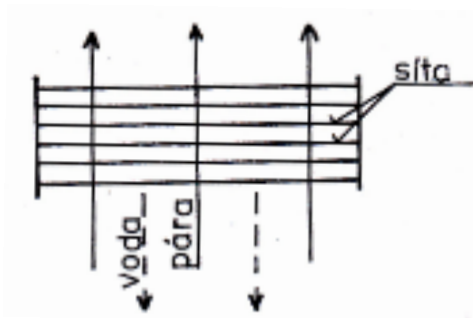
- **Pasivní**
 - Elektrojiskrové nanesení ochranné vrstvy z rychlořezné slitiny, stelitu nebo wolframových slitin na lopatky turbíny.
 - Připájení stelitových pásků na lopatky pomocí elektrického ohřevu stříbrnou pájkou.
 - Povrchové kalení lopatek v oblasti vstupních hran.
- **Aktivní**
 - Vytápění duté rozváděcí lopatky parou přivedenou z regeneračního odběru.
 - Použití regeneračních odběrů páry z turbíny k současnému odvodu vlhkosti.
 - Odvod vody za oběžnými i rozváděcími lopatkami.
 - Vnitřní separátory vlhkosti, ve kterých dochází vlivem rotace páry, vzniklé na lopátkové mříži, k odstředění vlhkosti.
 - Vnější separátory vlhkosti.

4.1.2 Typy vnějších separátorů

- **Sítové**

Jsou tvořeny soustavou drátěných sít, které jsou umístěné vodorovně nebo jen pod mírným sklonem. Vlhká pára proudí od zdola nahoru rychlostí 1 až 2 m/s, díky čemuž mohou

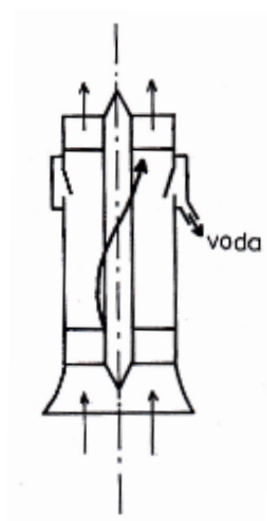
kapky vody ze sít odkapávat proti jejímu proudu. Navzdory nízkým tlakovým ztrátám i nízké zbytkové vlhkosti 0,1-0,2% jsou nevýhodné z důvodu jejich velkých rozměrů. [4]



Obrázek 4-1 Sítový separátor

- **Cyklónové**

Vstupující pára je pomocí nepohyblivých lopatek uvedena do rotace. Na základě vlivu odstředivé síly jsou těžké kapky unášeny na obvod cyklónu a odváděny štěrbinami. Lehčí kapky jsou odloučeny až ve výstupních difúzních lopatkách, ve kterých je část kinetické energie přeměněna na energii tlakovou. Cyklónové separátory mají velkou tlakovou ztrátu a vlhkost páry na výstupu se pohybuje kolem 1%. [4]

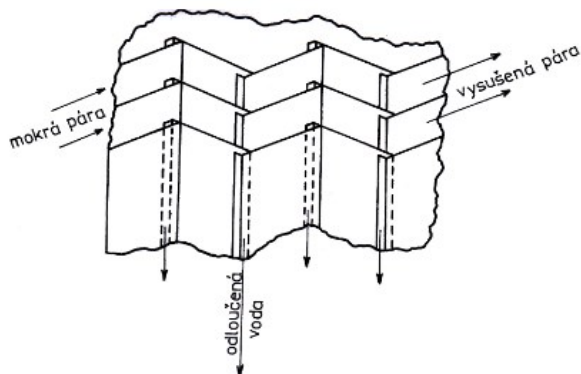


Obrázek 4-2 Cyklónový separátor

- **Žaluziové**

Žaluzie jsou vytvářeny vlnitým plechem s maximálním sklonem do 30°. Procházející mokrá pára neustále mění svůj směr, a tím dochází k odlučování kapek. Na žaluziích dochází ke tvorbě vodního filmu, který stéká svisle dolů. Značnou výhodou tohoto typu odlučováku je možná variabilita rychlosti toku mokré páry při zachování jeho účinnosti. Zbytková vlhkost

páry na výstupu je okolo 0,4 %. Nevýhodou je poměrně vysoká rychlost páry 5 až 10 m/s. Žaluziový separátor bude použit pro navrhované zařízení. [4]



Obrázek 4-3 Žaluziový separátor

4.1.3 Porovnání separátorů

Koncepční uspořádání základních typů cyklónových, síťových a žaluziových separátorů je popsáno v kapitole 4.1.2.

Typ separátoru	Zbytková vlhkost	Objem	Tlaková ztráta
Cyklónový	1	1	1
Sítový	0,1 až 0,2	10	0,01
Žaluziový	0,4	4	0,1

Tabulka 4-1 Poměrné hodnoty vůči hodnotám odpovídajícím cyklonovému odlučováku [4]

4.1.4 Požadavky na vnější separátory páry

- Snížení vlhkosti páry vystupující ze separátoru na méně než 1 %. S každým klesajícím procentem vlhkosti roste účinnost turbíny o 0,25 %.
- Snaha o minimalizování tlakových ztrát. Vlivem těchto ztrát dochází ke zhoršení tepelné účinnosti turbíny.
- Volba dispozičního uspořádání separátorů a spojovacích potrubí s ohledem na požadavky provozu s malými investičními náklady. [6]

4.2 Přihřívák páry

Nejčastěji se přihříváky páry používají mezi vysokotlakým a nízkotlakým dílem turbíny společně se separátorem. Přihřívák může být napojen na ostrou páru z parogenerátoru, odběrovou páru z VT dílu parní turbíny či chladiwa reaktoru.

Existuje několik konstrukčních provedení PP:

- proudění přihříváné páry z vnější nebo vnitřní strany trubek;
- použití hladkých nebo žebrovaných trubek s podélnými či příčnými žebry;
- konstrukce se sběračem nebo trubkovnicí;
- vertikální nebo horizontální provedení.

Z těchto konstrukčních variant jsem pro navrhované zařízení zvolila proudění přihříváné páry z vnější strany trubek. Odběrová pára kondenzuje uvnitř trubek a odevzdává tím své latentní výparné teplo, které je stěnou trubek předáno přihříváné páře. Trubky jsou hladké, bez žeborů a se sběračem umístěným ve spodní části vertikálního přihříváku. Takto navržené zařízení je z ekonomického hlediska konstrukčně výhodnější. Horizontální provedení si vyžaduje širší strojovnu a delší spojovací potrubí.

4.3 Kombinované provedení separátoru a přihříváku páry

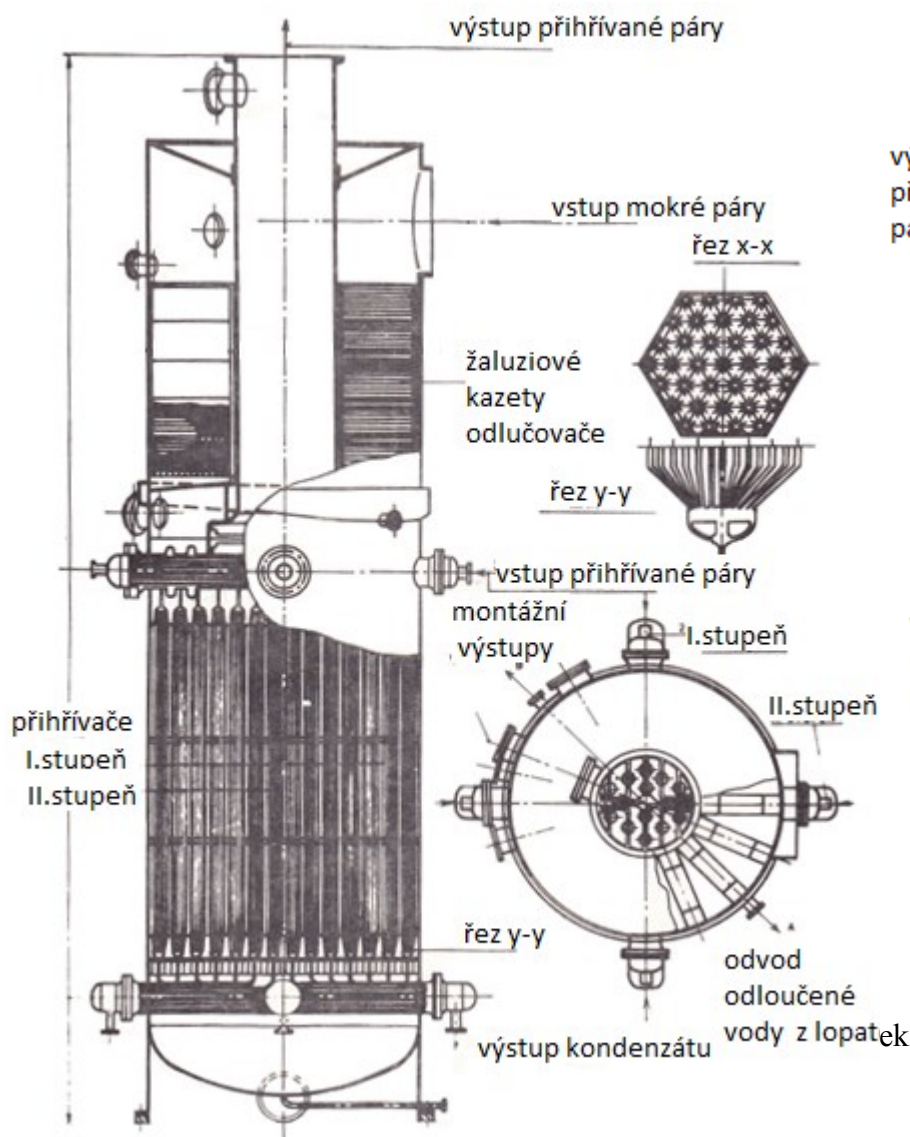
V této kapitole jsou popsány bloky stávajících jaderných elektráren. Jejich princip je velmi podobný SPP, který je navrhován v rámci této diplomové práce.

4.3.1 JE Dukovany

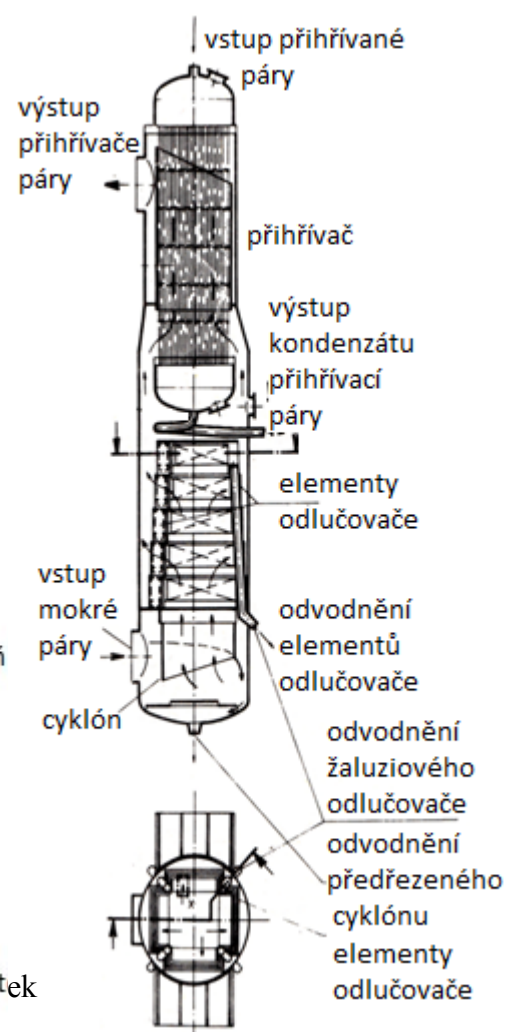
U parních turbín K-220MW Škoda na blocích VVER440 je SPP proveden vertikálně. Každá turbína má dvě samostatná zařízení, která jsou umístěná vedle jejího soustrojí. Přívodní i výstupní potrubí je v horní části SPP, což je dispozičně velmi výhodné. Pára vstupuje z boční části, prochází dolů žaluziovým separátorem vlhkosti pomocí vodících plechů. Odvod kondenzátu je řešen pomocí prstenců přivařených k vnějšímu plášti separátoru. První stupeň přihříváku je tvořen trubkovým svazkem a napájený 7. regulovaným odběrem o tlaku 1,3 MPa a s hmotnostním tokem 33,6 t/h. Druhý stupeň, jehož pára má parametry 2,6 MPa a 31,4 t/h, je napojený na 8. odběr. Šestihranné kazety jsou na obou stranách zaválcované v kruhových trubkovnicích zavařených do miskových sběračů viz obrázky 4-4. [6]

4.3.2 JE Biblis

V JE Biblis s jmenovitým výkonem 1200MW byla použita vertikální koncepce SPP. Celková výška zařízení je 20m a venkovní průměr 3m. Separátor je tvořen žaluziovými elementy a typ přehříváku je trubkový. Každá parní turbína má 2 SPP, s hmotnostním tokem páry na vstupu 2750 t/h, při tlaku 1,08MPa a vlhkosti 13%. Vstupující pára disponuje vlhkostí 0,5% a teplotou 220°C. Cesta páry v SPP je znázorněna pomocí šípek na obrázku 4-5. [6]



Obrázek 4-4 JE Dukovany

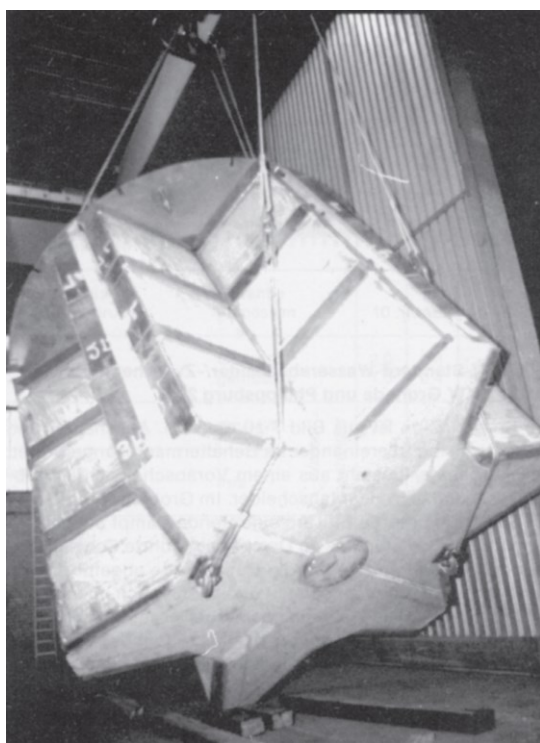


Obrázek 4-5 JE Biblis

4.3.3 JE Grohnde

Jaderná elektrárna Grohnde disponuje výkonem 1300MW. SPP jsou uspořádány nad sebou v jedné nádobě. Separátory se skládají z předběžného (tzv. hrubého) a hlavního odlučovače. Pára vstupuje přes spodní trysky a je směřována na základovou desku v hrubém separátoru. Zde je unášená voda v páře rozstříkována, oddělena a následně odváděna pod základní desku. Poté médium proudí nahoru přívodním kanálem na jemné separátory. Vnitřní válec je navrhován tak, aby se rychlost regulovala co nejrovnoměrněji po celém průřezu vstupního kanálu. Pára, ze které byly odstraněny kapky vody, pokračuje do jemných separátorů ve tvaru hvězdy, které jsou uspořádány ve třech úrovních nad sebou viz Obrázek 4-6. Pro zvětšení stabilizace průtoku páry jsou před a za separátorové svazky umístěny děrované plechy. Kondenzát je oddělen při průtoku páry přes přepážky, směřuje přes sběrné mísy a vodní kanály do kruhového prstence. Odtud přes trysky ven z nádoby.

V přihríváku proudí sytá pára do jeho středové části, a poté protéká diagonálním prouděním přes evu svazky, instalovanými v kruhovém uspořádání. Pomocí odběrové páry je ohřívána a vychází výstupními tryskami. Přihrívák je postaven tak, aby ve všech případech zatížení kompenzoval různé tepelné roztažnosti. Především mezi ohřívákovými svazky a obalem nádoby, taktéž mezi trubkami a svazkem (Obrázek 4-6 a Obrázek 4-7). [8]



Obrázek 4-6 Žaluziový separátor JE Grohnde



Obrázek 4-7 Pohled na přihrívák páry JE Grohnde

4.4 Protierozní ochrana

Všechny části separátoru, které přicházejí do styku s mokrou párou, musejí mít dostatečnou ochranu proti erozi. Část nádrže a spodní hlavy v hrubém separátoru se obvykle vyrábí z listů pokrytých austenitem. Všechny vnitřní části, jako základní desky, vnitřní válec, podpůrná deska jemného separátoru, bývají obloženy nebo vyrobeny z čistého austenitu. Jemný separátor je chráněn na straně počátečního proudu austenitickou izolací. Separátorové přepážky a zadní děrované desky jsou také vyráběny z austenitu. Eroze vznikající z kalů lze vyloučit pouze snížením zbytkové vlhkosti za hlavním separátorem na méně než 0.5 %. [8]

4.5 Výhody a nevýhody separátorů a přehříváků páry

Při zařazení separátoru a přehříváku páry mezi vysokotlaký a nízkotlaký díl turbíny dochází ke značnému zlepšení měrné spotřeby tepla cca o 1,5 %. Vstupní pára do NT turbíny je přehřátá a koncová vlhkost páry na konci turbíny je 8-10 %, což je nižší hodnota, než je tomu u turbín pracujících v elektrárnách na fosilní paliva. Další výhodou je její možné podchlazení až na úroveň Wilsonovy křivky, která je blíže popsána v kapitole 2.2.1. V případě netěsností v přehříváku nedochází k závažnějším problémům, protože na obou dvou stranách se jedná o stejné médium.

Jednou z nevýhod je poměrně velká velikost zařízení, které se musí umístit do strojovny a značně vysoká cena. Dále zařazení SPP do parního okruhu vyžaduje montáž dalšího potrubí na přívod a odvod páry. V případě náhlého odlehčení turbogenerátoru dochází vlivem velkého akumulovaného objemu páry ke zhoršení průběhu otáček a je zde nutnost zabudovat záchytné a rychlouzavírací klapky na vstupu páry do NT dílu turbíny. [5]

5 Výpočet

5.1 Návrh separátoru

Pro správnou funkci separátoru je důležité, aby byl proud mokré páry rovnoměrně rozveden přes zachytivé plochy a aby jejich účinek odpovídal výpočtovým předpokladům. Při výpočtu vycházím především z literatury [5], [9] a hodnoty odečítám z [10], [11]. Ostatní použitá literatura je uvedena u jednotlivých rovnic.

5.1.1 Parametry separátoru

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka
hustota syté vody	ρ'	893,385	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
hustota syté páry	ρ''	4,510	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
hmotnostní tok páry na vstupu do separátoru	\dot{m}_{pl}	750	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Tabulka 5-1 Hodnoty pro výpočet S1

Hustota syté vody i syté páry je odečtena pro teplotu 174°C. Hmotnostní tok páry na vstupu do separátoru je součástí zadání diplomové práce.

Povrchového napětí dle Bošinského

$$\sigma = 0,00714 \cdot g \cdot \left(\frac{\rho' - \rho''}{1000} \right)^4 \quad [\text{N} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (1)$$

$$\sigma = 0,00714 \cdot 9,81 \cdot \left(\frac{893,385 - 4,510}{1000} \right)^4 \quad [\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$$

$$\sigma = 0,0437 \quad [\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$$

Měrný objem syté páry

$$v = \frac{1}{\rho''} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2)$$

$$v = \frac{1}{4,510} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$v = 0,222 \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Kritická rychlost páry dle Ramzinova vzorce

$$w_{\text{krit}} = 740 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho'' \cdot g}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

$$w_{\text{krit}} = 740 \cdot \sqrt{\frac{0,0437}{4,510 \cdot 9,81}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$w_{\text{krit}} = 23,257 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Dovolená rychlost páry

Rychlost páry by neměla překročit 20 až 50% kritické rychlosti v separátoru, protože by se mohl začít trhat vodní film vytvořený na povrchu žaluzií a voda by se pak opět s párou smísila.

$$w_{\text{dov}} = (0,2 \div 0,5) \cdot w_{\text{krit}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

$$w_{\text{dov}} = (0,2 \div 0,5) \cdot 23,257 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$w_{\text{dov}} = 4,651 \div 11,629 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Z intervalu vypočtené dovolené rychlosti volím 0,25ti násobek kritické rychlosti, což odpovídá $5,814 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Výpočtová průtočná plocha žaluziovým separátorem

$$S_{\text{zs}} = \frac{\dot{m}_{\text{p1}} \cdot v}{w_{\text{dop}}} \quad [\text{m}^2] \quad (5)$$

$$S_{\text{zs}} = \frac{750 \cdot 0,222}{5,814} \quad [\text{m}^2]$$

$$S_{\text{zs}} = 28,638 \quad [\text{m}^2]$$

Navrhuji hvězdicové uspořádání 12 ti kazet ve třech sekcích nad sebou. Jejich rozměry volím dle stávajícího zařízení v JE Grohnde. Šířka jedné kazety 200mm a výška 800mm. Délka je navržena vzhledem k rozměrům celého zařízení 1080mm. Vzdálenost mezi jednotlivými plechy se volí v rozmezí 5 až 10mm. V případě nižší rozteče než 5 mm může dojít k zaplnění jednotlivých mezer vodou. Tím by došlo ke zvýšení rychlosti páry, hrozilo

by nebezpečí překročení kritické rychlosti a následné strhávání vodního filmu zpět do páry. Z tohoto důvodu volím rozteč žaluzií 10mm. [9]

Navržená průtočná plocha žaluziovým separátorem

$$S_{zs,sk} = a \cdot 3 \cdot h \cdot n \quad [\text{m}^2] \quad (6)$$

$$S_{zs,sk} = 1,08 \cdot 3 \cdot 0,8 \cdot 12 \quad [\text{m}^2]$$

$$S_{zs,sk} = 31,104 \quad [\text{m}^2]$$

$$S_{zs} \leq S_{zs,sk}$$

Výpočtová průtočná plocha tvoří 92,072% navržené plochy žaluziového separátoru, což je dostatečná rezerva pro mimořádné provozní stavy separátoru.

5.1.2 Hydraulický výpočet žaluziového separátoru

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka
koeficient odporu žaluzie	ξ	9,78	-
suchost vstupující páry do separátoru	x_1	0,87	-
suchost vystupující páry ze separátoru	x_2	0,99	-
hmotnostní tok páry na vstupu do separátoru	\dot{m}_{p1}	750	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
hustota mokré páry na vstupu do separátoru	ρ_1	5,180	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
tlak páry před separátorem	p_1	800000	Pa

Tabulka 5-2 Hodnoty pro výpočet S2

Koeficient odporu žaluzie byl odečten z literatury [12]. Suchost na výstupu z S a hmotnostní tok je zadán.

Tlaková ztráta v separátoru

$$\Delta p_z = \xi \cdot \rho_1 \cdot \frac{w_{\text{dop}}^2}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (7)$$

$$\Delta p_z = 9,78 \cdot 5,180 \cdot \frac{5,814^2}{2} \quad [\text{Pa}]$$

$$\Delta p_z = 856,227 \quad [\text{Pa}]$$

Tlak páry na výstupu ze separátoru

$$p_2 = p_1 - \Delta p_z \quad [\text{Pa}] \quad (8)$$

$$p_2 = 800000 - 856,227 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_2 = 799143,773 \quad [\text{Pa}]$$

Jelikož je tlaková ztráta v žaluziovém separátoru minimální, její velikost zanedbávám, a tlak páry na vstupu do separátoru uvažuji 0,8MPa.

Hmotnostní tok kondenzátu na výstupu ze separátoru

$$\dot{m}_k = (x_2 - x_1) \cdot \dot{m}_{p1} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9)$$

$$\dot{m}_k = (0,99 - 0,87) \cdot 750 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\dot{m}_k = 90 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Hmotnostní tok páry na výstupu ze separátoru

$$\dot{m}_{p2} = \dot{m}_{p1} - \dot{m}_k \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

$$\dot{m}_{p2} = 750 - 90 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\dot{m}_{p2} = 660 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

5.1.3 Přepočet navrhovaného zařízení dle Kutateladzeho kritéria

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka
parametr charakterizující maximální zatížení	C	4,5	-
suchost vstupující páry do separátoru	x_1	0,87	-
celková výška kazet	h_c	2,4	m
rozteč žaluzií	t	0,01	m
polovina úhlu zakřivení	φ	48	°
šířka žaluziové kazety	e	1,08	m
počet kazet	n	12	-
hustota syté vody	ρ'	893,385	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
hustota syté páry	ρ''	4,510	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
měrný objem syté páry	v	0,222	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
rozvinutá šířka žaluzie	r	0,261	m
povrchové napětí dle Bošinského	σ	0,0437	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

Tabulka 5-3 Hodnoty pro výpočet S3

Hodnoty vycházejí z již navržených rozměrů separátoru, které jsou blíže popsány v předchozím výpočtu.

Kutateladzeho kritérium pro vertikální žaluzie

$$Ku = C - 1,69 \cdot \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,56} \cdot \left(\frac{h \cdot t}{r}\right)^{0,25} \cdot \frac{1}{\cos \varphi} \quad [-] \quad (11)$$

$$Ku = 4,5 - 1,69 \cdot \left(\frac{1-0,87}{x}\right)^{0,56} \cdot \left(\frac{3 \cdot 0,8 \cdot 0,01}{0,261}\right)^{0,25} \cdot \frac{1}{\cos 48} \quad [-]$$

$$Ku = 4,02 \quad [-]$$

Kritická rychlost

$$w_{krit,K} = Ku \cdot \frac{\sqrt[4]{g \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'')}}{\sqrt{\rho''}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (12)$$

$$w_{krit,K} = 4,02 \cdot \frac{\sqrt[4]{9,81 \cdot 0,0437 \cdot (893,385 - 4,510)}}{\sqrt{4,510}} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$w_{krit,K} = 8,363 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Dovolená rychlost rychlost

$$w_{dop,K} = (0,2 \div 0,7) \cdot w_{krit} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (13)$$

$$w_{dop,K} = (0,2 \div 0,7) \cdot 8,363 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$w_{dop,K} = 1,673 \div 5,854 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Z intervalu vypočtené dovolené rychlosti volím 0,7 násobek kritické rychlosti, což odpovídá $5,854 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Čím více se blíží kritické rychlosti, tím vyšší je účinnost separace.

Výpočtová průtočná plocha žaluziovým separátorem

$$S_{zs,K} = \frac{\dot{m}_{p1} \cdot v}{w_{dop}} \quad [m^2] \quad (14)$$

$$S_{zs,K} = \frac{750 \cdot 0,222}{5,854} \quad [m^2]$$

$$S_{zs,K} = 28,442 \quad [m^2]$$

Výpočtová plocha dle Kutateladzeho kritéria je téměř totožná se spočtenou plochou dle Ramzimova vzorce.

5.1.4 Účinnost navrženého separátoru

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka
suchost vstupující páry do separátoru	x_1	0,87	-
suchost vystupující páry ze separátoru	x_2	0,99	-

Tabulka 5-4 Hodnoty pro výpočet S4

$$\eta_{\text{sep}} = \frac{\Delta y}{y_a} = \frac{(1 - x_1) - (1 - x_2)}{(1 - x_1)} \quad [-] \quad (15)$$

$$\eta_{\text{sep}} = \frac{(1 - 0,87) - (1 - 0,99)}{(1 - 0,87)} \quad [-]$$

$$\eta_{\text{sep}} = 0,923 \quad [-]$$

Účinnost navrženého separátoru činí 92,3 %.

5.2 Návrh přehříváku páry

Jak již bylo popsáno v kapitole 4.2 navrhovaný přehřívák bude vertikálního provedení. Topné médium protéká uvnitř trubek, uspořádaných ve svazcích, které obtéká přehříváná pára. Výpočet je proveden dle literatury [13], [14], [15] a [16]. Další literatura je uvedena u jednotlivých výpočtů.

5.2.1 Rychlost proudění

Hodnoty potřebné pro výpočet topného média

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
měrný objem topné páry	v_{TP}	0,026422	$m^3 \cdot kg^{-1}$	$x_{TP}=1; t_{TP}=288^\circ C$
měrný objem kondenzátu TP	$v_{K,TP}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$m^3 \cdot kg^{-1}$	$x_{TK}=0; t_{TK}=288^\circ C$
hmotnostní tok TP na vstupu do přehříváku	\dot{m}_{TP}	100	$kg \cdot s^{-1}$	
vnitřní průměr trubky přehříváku	d_1	0,016	m	
navržený počet trubek	n_{tr}	5394	-	

Tabulka 5-5 Hodnoty pro výpočet P1

Měrný objem kondenzátu topné páry odečítám z literatury [13] - pro ideální podmínku, dle které je jeho suchost rovna nule. Ve skutečnosti se jeho výstupní suchost pohybuje v rozmezí 0,03 - 0,06. [4] Počet trubek volím dle předběžného výpočtu, který jsem si vytvořila v Excelu a je součástí přílohy této diplomové práce.

Střední měrný objem topné páry a jejího kondenzátu

$$v_{stř,TP} = \frac{v_{TP} + v_{K,TP}}{2} \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (16)$$

$$v_{stř,TP} = \frac{0,026422 + 0,00136}{2} \quad [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$v_{stř,TP} = 0,013891 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Střední rychlost topné páry v trubkách přehříváku

$$w_{TP} = \frac{4 \cdot \dot{m}_{TP} \cdot v_{stř,TP}}{\pi \cdot d_1^2 \cdot n_{tr}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (17)$$

$$w_{TP} = \frac{4 \cdot 100 \cdot 0,013891}{\pi \cdot 0,016^2 \cdot 5394} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$w_{TP} = 1,281 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Hodnoty potřebné pro výpočet přehřívajícího média

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
šířka kazety	e	0,72	m	
výška kazety	l	5,32	m	
vnější průměr trubky	d ₂	0,019	m	
počet kazet	z ₁	6	-	
rozteč trubek	S ₁	0,023	m	
hmotnostní tok páry na výstupu ze separátoru	m _{p2}	660	kg·s ⁻¹	
měrný objem přehřívající páry na vstupu do přehříváku	v _{P vstup}	0,214643	m ³ ·kg ⁻¹	t _{p2} =174, p ₂ =0,8MPa
měrný objem přehřívající páry na výstupu z přehříváku	v _{P výstup}	0,041785	m ³ ·kg ⁻¹	t _{p3} =260°C, x ₃ =0,99

Tabulka 5-6 Hodnoty potřebné pro výpočet P2

Plochy mezi trubkami, kanálem a čelní plochy trubek

Při návrhu velikosti jedné kazety jsem vycházela z přibližných rozměrů SPP, který je užíván v jaderné elektrárně Grohnde. Kontrolu parametrů kazety jsem provedla v předběžném výpočtu v Excelu.

Obsah obdélníkového průřezu kanálu

$$S_{OP} = e \cdot l \quad [\text{m}^2] \quad (18)$$

$$S_{OP} = 0,72 \cdot 5,32 \quad [\text{m}^2]$$

$$S_{OP} = 3,830 \quad [\text{m}^2]$$

Čelní plocha jedné trubky

$$S_{\check{C}T} = l \cdot d_2 \quad [\text{m}^2] \quad (19)$$

$$S_{\check{C}T} = 5,320 \cdot 0,019 \quad [\text{m}^2]$$

$$S_{\check{C}T} = 0,101 \quad [\text{m}^2]$$

Počet trubek na šíři kazety

$$n_{tr,\check{s}} = \frac{e}{S_1} \quad [-] \quad (20)$$

$$n_{tr,\check{s}} = \frac{0,72}{0,023} \quad [-]$$

$$n_{tr,\check{s}} = 31,304 \cong 31 \quad [-]$$

Čelní plocha trubek v šesti kazetách

$$S_{\check{C}T,C} = z_1 \cdot [S_{OP} - (S_{\check{C}T} \cdot n_{tr,\check{s}})] \quad [m^2] \quad (21)$$

$$S_{\check{C}T,C} = 6 \cdot [3,830 - (0,101 \cdot 31)] \quad [m^2]$$

$$S_{\check{C}T,C} = 4,194 \quad [m^2]$$

Střední měrný objem přehřívané páry

$$v_{stř,PP} = \frac{v_{p \text{ vstup}} + v_{p \text{ výstup}}}{2} \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (22)$$

$$v_{stř,PP} = \frac{0,214643 + 0,041785}{2} \quad [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$v_{stř,PP} = 0,128214 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Střední rychlost přehřívané páry

$$w_{stř,PP} = \frac{\dot{m}_{p2} \cdot v_{stř,PP}}{S_{\check{C}T,C}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (23)$$

$$w_{stř,PP} = \frac{660 \cdot 0,128214}{4,194} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$w_{stř,PP} = 20,177 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

5.2.2 Druh proudění na straně přehřívané páry

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
teplota páry na vstupu do přehříváku	t_{p2}	174	°C	
teplota páry na výstupu z přehříváku	t_{p3}	260	°C	
hydraulický průměr dle literatury	d_h	0,019	m	
kinematická viskozita PP	ν	0,0000149	$m^2 \cdot s^{-1}$	$t=174^\circ C$

Tabulka 5-7 Hodnoty potřebné pro výpočet P3

Střední teplota páry přehřívané páry

$$t_{\text{stř}} = \frac{t_{p2} + t_{p3}}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (24)$$

$$t_{\text{stř}} = \frac{174 + 260}{2} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$t_{\text{stř}} = 217 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Reynoldsovo kritérium

Počítá se pro rychlost v nejužším místě mezi trubkami.

$$\text{Re} = \frac{d_h \cdot w_{\text{stř,PP}}}{\nu} \quad [-] \quad (25)$$

$$\text{Re} = \frac{0,019 \cdot 20,177}{0,0000149} \quad [-]$$

$$\text{Re} = 25729,060 \quad [-]$$

Jedná se o vynucenou konvekci, při které dochází k proudění páry kolmo na svazek trubek. Nastává zde turbulentní proudění.

5.2.3 Přestup tepla

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
rozteč trubek	S_1	0,023	m	
rozteč trubek	S_2	0,023	m	
konstanta dle uspořádání trubek	c_t	0,41	-	střídavé uložení
exponent dle uspořádání trubek	m	0,6	-	
Prandtlovo číslo pro střední teplotu PP	Pr	1,45	-	$t=174^{\circ}\text{C}$
součinitel vyjadřující změnu přestupu tepla v první řadě	ε_1	0,6	-	
součinitel vyjadřující změnu přestupu tepla v druhé řadě	ε_2	0,7	-	
tepelná vodivost přehřívané páry	λ	0,03739	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$t_{\text{PP}}=174$ $p_2=0,8\text{MPa}$

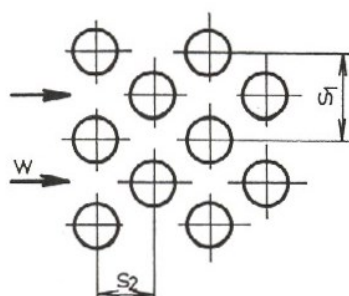
Tabulka 5-8 Hodnoty potřebné pro výpočet P8

Součinitel vlivu poměrných roztečí na přestup tepla

$$\varepsilon_s = \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{\frac{1}{6}} \quad [-] \quad (26)$$

$$\varepsilon_s = \left(\frac{0,023}{0,023} \right)^{\frac{1}{6}} \quad [-]$$

$$\varepsilon_s = 1 \quad [-]$$



Obrázek 5-1 Uspořádání trubek [14]

Nusseltovo kritérium

Pro $Re = 10^3 \div 10^5$

$$Nu = c_t \cdot Re^m \cdot Pr^{0,33} \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_i \quad [-] \quad (27)$$

$$Nu = 0,41 \cdot 25729,060^{0,6} \cdot 1,45^{0,33} \cdot 1 \cdot 1 \quad [-]$$

$$Nu = 205,253 \quad [-]$$

Součinitel přestupu tepla na straně přehřívané páry

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_2} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (28)$$

$$\alpha = \frac{205,253 \cdot 0,03739}{0,019} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$\alpha = 403,916 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Střední součinitel přestupu tepla na straně přehřívané páry

$$\alpha_{PP,stř} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \alpha + \varepsilon_1 \cdot \alpha + \varepsilon_2 \cdot \alpha + \varepsilon_2 \cdot \alpha + \alpha \cdot (n_{tr,s} - 4)}{n_{tr,s}} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (29)$$

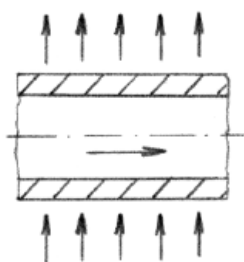
$$\alpha_{PP,stř} = \frac{0,6 \cdot 403,916 + 0,6 \cdot 403,916 + 0,7 \cdot 403,916 + 0,7 \cdot 403,916 + 403,916 \cdot (31 - 4)}{31}$$

$$\alpha_{PP,stř} = 388,423 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Součinitel přestupu tepla na straně topné páry

Z důvodu velmi komplikovaného výpočtu přestupu tepla při kondenzaci topné páry uvnitř trubky, které jsou kolmo obtékány ohřívanou párou (Obrázek 5-2), je hodnota α_{TP} odečtena z literatury [23].

$$\alpha_{TP} = 10500 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$



Obrázek 5-2 Prodění médií

5.2.4 Prostup tepla

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka
vnitřní průměr trubky	d_1	0,016	m
vnější průměr trubky	d_2	0,019	m
součinitel přestupu tepla na straně TP	α_{TP}	10500	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
střední součinitel přestupu tepla na straně PP	$\alpha_{PP,stř}$	388,423	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
součinitel přestupu tepla na straně TP	α_{TP}	10500	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
tepelná vodivost oceli 13 123.1	λ_O	41,7	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
tepelná vodivost nánosu $CaCO_3$	λ_n	2,4	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Tabulka 5-9 Hodnoty pro výpočet P5

Vnitřní průměr zanesené trubky

Výpočet prostupu tepla zahrnuje i vliv nánosů CaCO_3 , které mohou vzniknout uvnitř trubek přehříváku během jeho provozu. Pokud je voda v oběhu dostatečně upravená, velikost tvorby vodního kamene je minimální. Do výpočtu je zohledněn nános o velikosti 1 mm.

$$d_n = d_1 - 0,002 \quad [\text{m}] \quad (30)$$

$$d_n = 0,016 - 0,002 \quad [\text{m}]$$

$$d_n = 0,014 \quad [\text{m}]$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{1}{\frac{d_2}{d_n \cdot \alpha_{TP}} + \frac{d_1}{2 \cdot \lambda_n} \cdot \ln \frac{d_1}{d_n} + \frac{d_2}{2 \cdot \lambda_o} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{PP, stř}}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (31)$$

$$k = \frac{1}{\frac{0,019}{0,014 \cdot 10500} + \frac{0,016}{2 \cdot 2,4} \cdot \ln \frac{0,016}{0,014} + \frac{0,019}{2 \cdot 41,7} \cdot \ln \frac{0,019}{0,016} + \frac{1}{388,423}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$k = 313,674 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

5.2.5 Střední logaritmický spád

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka
teplota páry na vstupu do přehříváku	t_{p2}	174	$^{\circ}\text{C}$
teplota páry na výstupu z přehříváku	t_{p3}	260	$^{\circ}\text{C}$
teplota topné páry	t_{TP}	288	$^{\circ}\text{C}$

Tabulka 5-10 Hodnoty pro výpočet P6

$$\Delta t_1 = \frac{t_{p3} - t_{p2}}{\ln \frac{t_{TP} - t_{p2}}{t_{TP} - t_{p3}}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (32)$$

$$\Delta t_1 = \frac{260 - 174}{\ln \frac{288 - 174}{288 - 260}} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\Delta t_1 = 61,254 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

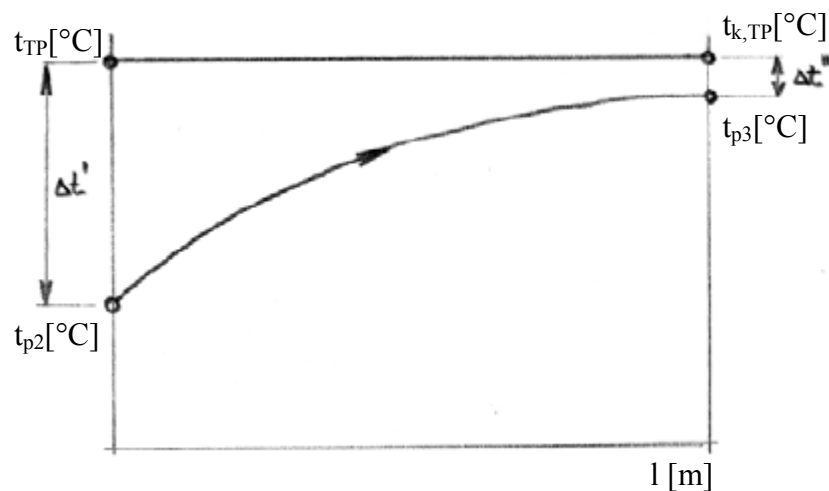


Diagram 5-1 Průběh teplot v přehříváku

5.2.6 Velikost teplosměnné plochy vnějšího povrchu trubek

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
hmotnostní tok PP na vstupu do přehříváku	\dot{m}_{p2}	660	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	
entalpie páry na vstupu do přehříváku	i_2	2751416	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$t_{p2}=174^\circ\text{C}$
entalpie páry na výstupu z přehříváku	i_3	2796644	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$t_{p3}=260^\circ\text{C}$
součinitel prostupu tepla	k	313,674	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
střední (logaritmický) spád	Δt_1	61,254	$^\circ\text{C}$	

Tabulka 5-11 Hodnoty pro výpočet P7

Tepelný výkon přehříváku

$$Q = \dot{m}_{p2} \cdot (i_3 - i_2) \quad [\text{W}] \quad (33)$$

$$Q = 660 \cdot (2796644 - 2751416) \quad [\text{W}]$$

$$Q = 29850480 \quad [\text{W}]$$

Teoretická velikost teplosměnné plochy

$$S_t = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_1} \quad [\text{m}^2] \quad (34)$$

$$S_t = \frac{29850480}{313,674 \cdot 61,254} \quad [\text{m}^2]$$

$$S_t = 1553,597 \quad [\text{m}^2]$$

Teoretická délka trubky

$$l_t = \frac{S_t}{\pi \cdot d_2 \cdot n_{tr}} \quad [\text{m}] \quad (35)$$

$$l_t = \frac{1553,597}{\pi \cdot 0,019 \cdot 5394} \quad [\text{m}]$$

$$l_t = 4,825 \quad [\text{m}]$$

Skutečná velikost teplosměnné plochy navrženého přehříváku

$$S_{sk} = n_{tr} \cdot l \cdot d_2 \cdot \pi \quad [\text{m}^2] \quad (36)$$

$$S_{sk} = 5394 \cdot 5,32 \cdot 0,019 \cdot \pi \quad [\text{m}^2]$$

$$S_{sk} = 1712,876 \quad [\text{m}^2]$$

Stanovení teoretické hodnoty koeficientu rezervní plochy

$$k_r = \frac{S_{sk} - S_T}{S_T} \cdot 100 \quad [\%] \quad (37)$$

$$k_r = \frac{1712,876 - 1553,597}{1553,597} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$k_r = 10,252 \quad [\%]$$

Navržené parametry přehříváku vyhovují výpočtovým hodnotám s dostatečně velkou rezervní plochou.

5.3 Pevnostní kontrola

Celý výpočet je proveden dle normy ČSN 69 0010 – Tlakové nádoby stabilní a ČSN 69 0011- Pevnostní výpočet částí tlakových nádob.

5.3.1 Pevnostní kontrola válcového pláště SPP s vnitřním přetlakem

Výpočet tloušťky stěny válcových nádob s vnitřním přetlakem je založen na membránové teorii válcové skořepiny velké délky. Předpokládá se, že porušení nastane vlivem obvodového napětí.

Rozsah platnosti

Ověření možnosti pevnostního výpočtu dle normy ČSN 69 0011:

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka
vnější průměr pláště SPP	D_{SPP}	4,8	m
provedená tloušťka stěny	s_p	0,023	m

Tabulka 5-12 Hodnoty pro výpočet PK1

$$\frac{D_{SPP}}{D_{SPP} - 2 \cdot s_p} \leq 1,3 \quad (38)$$

$$\frac{4,8}{4,8 - 2 \cdot 0,023} \leq 1,3$$

$$1,01 \leq 1,3$$

Podmínku splňuji a následný postup výpočtu je proveden dle výše uvedené normy.

KONTROLA PRO PROVOZNÍ STAV

Volba materiálu

Při hledání vhodného materiálu pro válcový plášť SPP jsem zvolila martinskou ocel 13 123.5, která je vhodná pro vyšší tlaky a teploty se zaručenou svařitelností. Základní legující prvky oceli třídy 13 jsou mangan a křemík – Mn většinou více jak 1%, Si více jak 0,5%. Používají se tam, kde svými vlastnostmi nevyhovuje ušlechtilá uhlíková ocel a chromová či chromniklová ocel by byla zbytečně nákladná. Mangan je často levnou a dobrou náhradou niklu. [21]

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
mez kluzu oceli 13 123.5	Re _o	216	MPa	t=350°C
mez pevnosti oceli 13 123.5	Rm	490	MPa	

Tabulka 5-13 Hodnoty pro výpočet PK2

Dovolené namáhání

Dovolené namáhání je spočteno dle vztahu, který platí do max. výpočtové teploty +350°C, ve kterém jsou součinitelé bezpečnosti odečteny z literatury [18] pro netopenou ocelovou stěnu.

Dovolené namáhání dle meze kluzu

$$\sigma_{\text{dov}} = \frac{Re_o}{x_{B1}} \quad [\text{MPa}] \quad (39)$$

$$\sigma_{\text{dov}} = \frac{216}{1,5} \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_{\text{dov}} = 144 \quad [\text{MPa}]$$

Dovolené namáhání dle meze pevnosti v tahu

$$\sigma_{\text{dov,P}} = \frac{Rm}{x_{B2}} \quad [\text{MPa}] \quad (40)$$

$$\sigma_{\text{dov,P}} = \frac{490}{2,4} \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_{\text{dov,P}} = 204,167 \quad [\text{MPa}]$$

Ve výpočtu pokračuji s nižší hodnotou dovoleného namáhání dle meze kluzu.

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
výpočtový přetlak	p	0,8	MPa	Jedná se o nejvyšší přetlak v nádobě.
vnější průměr pláště SPP	D _{SPP}	4,8	m	
dovolené namáhání	σ _{dov}	144	MPa	
provedená tloušťka stěny	s _p	0,023	m	
součinitel svarového spoje	v	0,7	-	dle ČSN 411 416

Tabulka 5-14 Hodnoty pro výpočet PK3

Základní výpočtová tloušťka stěny pláště

$$s_{o1} = \frac{p \cdot D_{SPP}}{2 \cdot \sigma_{dov} \cdot v + p} \quad [m] \quad (41)$$

$$s_{o1} = \frac{0,8 \cdot 10^6 \cdot 4,8}{2 \cdot 144 \cdot 10^6 \cdot 0,7 + 0,8 \cdot 10^6} \quad [m]$$

$$s_{o1} = 0,0191 \quad [m]$$

Podmínka bezpečnosti válcového pláště:

$$s_p > s_{o1}$$

$0,023 > 0,0191$ tloušťka stěny vyhovuje výpočtovému přetlaku

Nejmenší tloušťka stěny pro provozní podmínky

$$s_{pl} = s_{o1} + c \quad [m] \quad (42)$$

Kde c je přídavek k základní výpočtové tloušťce, který je dán součtem:

$$c = c_1 + c_2 \quad [m] \quad (43)$$

c_1 ... Přídavek na výrobní nepřesnosti a zápornou výrobní úchylku tloušťky. Záporná úchylka se neuvažuje, pokud nepřekročí 5% jmenovité tloušťky materiálu. Přídavek na zápornou úchylku tloušťky plechu je možno odečíst z diagramu uvedeného v normě ČSN 69 001, dle kterého je pro 0,022 m roven 0.

c_2 ... Přídavek na korozi, který se určí podle druhu pracovní látky uvnitř a vně nádoby odpovídá hodnotě 0,002m.

$$c = 0 + 0,002 \quad [m]$$

$$c = 0,002 \quad [m]$$

Poté

$$s_{pl} = s_{o1} + c \quad [m]$$

$$s_{pl} = 0,0191 + 0,002 \quad [m]$$

$$s_{pl} = 0,0211 \quad [m]$$

Podmínka bezpečnosti válcového pláště:

$$s_p > s_{p1}$$

0,023 > 0,0211 tloušťka stěny vyhovuje výpočtovému přetlaku

KONTROLA PRO TLAKOVOU ZKOUŠKU

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
zkušební mez kluzu oceli 13 123.5	Re_z	265	MPa	$t=20^{\circ}\text{C}$
zkušební součinitel bezpečnosti pro válcovanou ocel	x_z	1,15	-	pro Re_z při 20°C
vnější průměr pláště SPP	D_{SPP}	4,8	m	
provedená tloušťka stěny	s_p	0,023	m	
součinitel svarového spoje	v	0,7	-	dle ČSN 411 416

Tabulka 5-15 Hodnoty pro výpočet PK4

Zkušební přetlak

Tlaková zkouška se provádí zkušebním přetlakem p , který je 1,3 násobkem výpočtového přetlaku.

$$p_z = 1,3 \cdot p \quad [\text{MPa}] \quad (44)$$

$$p_z = 1,3 \cdot 0,8 \quad [\text{MPa}]$$

$$p_z = 1,04 \quad [\text{MPa}]$$

Zkušební dovolené namáhání SPP

$$\sigma_{\text{dov},z} = \frac{Re_z}{x_z} \quad [\text{MPa}] \quad (45)$$

$$\sigma_{\text{dov},z} = \frac{265}{1,15} \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_{\text{dov},z} = 230,435 \quad [\text{MPa}]$$

Zkušební výpočtová tloušťka stěny pláště

$$s_{pl,z} = \frac{p_z \cdot D_{SPP}}{2 \cdot \sigma_{dov,z} \cdot v + p_z} \quad [m] \quad (46)$$

$$s_{pl,z} = \frac{1,04 \cdot 10^6 \cdot 4,8}{2 \cdot 230,435 \cdot 10^6 \cdot 0,7 + 1,04 \cdot 10^6} \quad [m]$$

$$s_{pl,z} = 0,0154 \quad [m]$$

Podmínka bezpečnosti válcového pláště při tlakové zkoušce:

$$s_p > s_{pl,z}$$

$0,023 > 0,0154$ tloušťka stěny vyhovuje zkušebnímu přetlaku

Nejmenší tloušťka stěny při tlakové zkoušce

$$s_{p,z} = s_{pl,z} + c \quad [m] \quad (47)$$

$$s_{p,z} = 0,0154 + 0,002 \quad [m]$$

$$s_{p,z} = 0,0174 \quad [m]$$

5.3.2 Pevnostní kontrola dna nádoby

Výpočet tloušťky stěny dna vychází z membránové teorie kulové skořepiny, opravné na ohybová namáhání při skutečném tvaru dna a styku této skořepiny s válcovou skořepinou součinitelem β_s , zjištěným měřením. Hodnota této veličiny je odečtena z diagramu v normě ČSN 69 0011 na základě výpočtu, ve kterém H [m] je hloubka klenutí.

$$\frac{H}{D_{SPP}} = \frac{0,88}{4,8} \quad [-] \quad (48)$$

$$\frac{H}{D_{SPP}} = 0,183 \quad [-]$$

Rozsah platnosti

Výpočet platí pro svařovaná dna, pokud je splněna podmínka:

$$\beta_s > \frac{1}{v} \quad (49)$$
$$2 > \frac{1}{0,7}$$

Podmínka je splněna.

Dno je vyrobeno z jednoho plechu, popř. z několika plechů vzájemně svařených tupými svary před tvářením nebo po něm. Pro všechny uvedené typy vyhotovení dna platí stejný postup pevnostního výpočtu. Dno separátoru a přehříváku páry je vyrobeno ze stejného materiálu jako válcový plášť nádoby.

KONTROLA PRO PROVOZNÍ STAV

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
vnější průměr pláště SPP	D_{SPP}	4,8	m	
výpočtový přetlak	p	0,8	MPa	Jedná se o nejvyšší přetlak v nádobě.
opravný součinitel	β	3,2	-	dle lit. č.18
dovolené namáhání dle meze	σ_{dov}	144		dle rovnice č.39
provedená tloušťka dna	s_{dno}	0,025	m	
přídavek výpočtové tloušťce	c	0,002	m	dle rovnice č.43

Tabulka 5-16 Hodnoty pro výpočet PK5

Základní výpočtová tloušťka stěny dna

Hodnota 0,001m znamená přídavek na zmenšení tloušťky dna při lisování.

$$s_{o2} = \frac{p \cdot D_{SPP} \cdot \beta}{4 \cdot \sigma_{dov}} + 0,001 \quad [\text{m}] \quad (50)$$

$$s_{o2} = \frac{0,8 \cdot 10^6 \cdot 4,8 \cdot 3,2}{4 \cdot 144 \cdot 10^6} + 0,001 \quad [\text{m}]$$

$$s_{o2} = 0,0223 \quad [\text{m}]$$

Podmínka bezpečnosti dna SPP:

$$s_{dna} > s_{o2}$$

0,025 > 0,0223 tloušťka dna vyhovuje výpočtovému přetlaku

Nejmenší tloušťka stěny dna pro provozní podmínky

$$s_D = s_{o2} + c \quad [\text{m}] \quad (51)$$

$$s_D = 0,0223 + 0,002 \quad [\text{m}]$$

$$s_D = 0,0243 \quad [\text{m}]$$

Podmínka bezpečnosti dna SPP:

$$s_{\text{dna}} > s_D$$

0,025 > 0,0243 tloušťka stěny vyhovuje výpočtovému přetlaku

KONTROLA PRO TLAKOVOU ZKOUŠKU

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
zkušební přetlak	p_z	1,04	MPa	dle rovnice č. 44
vnější průměr pláště SPP	D_{SPP}	4,8	m	
opravný součinitel	β	3,2	-	dle lit. č. 18
zkušební dovolené namáhání	$\sigma_{\text{dov,z}}$	230,435	MPa	dle rovnice č. 45
součinitel svarového spoje	v	0,7	-	dle ČSN 411 416
provedená tloušťka dna	s_{dno}	0,025	m	
přídavek výpočtové tloušťce	c	0,002	m	dle rovnice č. 43

Tabulka 5-17 Hodnoty pro výpočet PK6

Zkušební výpočtová tloušťka stěny dna

$$s_{D,z} = \frac{p_z \cdot D_{\text{SPP}} \cdot \beta}{4 \cdot \sigma_{\text{dov,z}}} + 0,001 \quad [\text{m}] \quad (52)$$

$$s_{D,z} = \frac{1,04 \cdot 10^6 \cdot 4,8 \cdot 3,2}{4 \cdot 230,435 \cdot 10^6} + 0,001 \quad [\text{m}]$$

$$s_{D,z} = 0,0183 \quad [\text{m}]$$

Podmínka bezpečnosti tloušťky dna SPP při tlakové zkoušce:

$$s_{\text{dno}} > s_{D,z}$$

0,025 > 0,0183 tloušťka dna vyhovuje zkušebnímu přetlaku

Nejmenší tloušťka dna při tlakové zkoušce

$$s_{\text{dno,z}} = s_{D,z} + c \quad [\text{m}] \quad (53)$$

$$s_{\text{dno,z}} = 0,0183 + 0,002 \quad [\text{m}]$$

$$s_{\text{dno,z}} = 0,0203 \quad [\text{m}]$$

Podmínka bezpečnosti dna SPP:

$$s_{\text{dna}} > s_{\text{dno, z}}$$

0,025 > 0,0203 tloušťka stěny vyhovuje zkušebnímu přetlaku

5.3.3 Pevnostní kontrola vrchlíkového víka

Výpočet vrchlíkového víka vychází z membránové teorie kulové skořepiny, přičemž na přídatná namáhání ohybem se bere ohled zvětšením tloušťky asi o 45%. Materiálem víka je ocel 13 123.5.

KONTROLA PRO PROVOZNÍ STAV

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
vnější poloměr vrchlíku	R	5	m	
výpočtový přetlak	p	0,8	MPa	
dovolené namáhání dle meze	σ_{dov}	144		dle rovnice č. 39
součinitel svarového spoje	v	0,7	-	dle ČSN 411 416
provedená tloušťka víka	$s_{\text{víko}}$	0,035	m	
přídavek výpočtové tloušťce	c	0,002	m	dle rovnice č. 43

Tabulka 5-18 Hodnoty pro výpočet PK7

Základní výpočtová tloušťka stěny víka

$$s_{03} = 1,6 \cdot \frac{p \cdot R}{2 \cdot \sigma_{\text{dov}} \cdot v} \quad [\text{m}] \quad (54)$$

$$s_{03} = 1,6 \cdot \frac{0,8 \cdot 10^6 \cdot 5}{2 \cdot 144 \cdot 10^6 \cdot 0,7} \quad [\text{m}]$$

$$s_{03} = 0,0317 \quad [\text{m}]$$

Podmínka bezpečnosti víka SPP:

$$s_{\text{víko}} > s_{03}$$

0,035 > 0,0317 tloušťka víka vyhovuje výpočtovému přetlaku

Nejmenší tloušťka vrchlíkového víka pro provozní podmínky

$$s_v = s_{03} + c \quad [\text{m}] \quad (55)$$

$$s_v = 0,0317 + 0,002 \quad [\text{m}]$$

$$s_v = 0,0337 \quad [\text{m}]$$

Podmínka bezpečnosti dna vrchlíkového víka:

$$s_{viko} > s_v$$

$0,035 > 0,0337$ tloušťka stěny vyhovuje výpočtovému přetlaku

KONTROLA PRO TLAKOVOU ZKOUŠKU

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
zkušební přetlak	p_z	1,04	MPa	dle rovnice č. 44
vnější poloměr vrchlíku	R	5	m	
zkušební dovolené namáhání SPP	$\sigma_{dov,z}$	230,435	MPa	dle rovnice č. 45
součinitel svarového spoje	v	0,7	-	dle ČSN 411 416
provedená tloušťka víka	s_{viko}	0,035	m	
přídavek výpočtové tloušťce	c	0,002	m	dle rovnice č. 43

Tabulka 5-19 Hodnoty pro výpočet PK8

Zkušební výpočtová tloušťka stěny víka

$$s_{v,z} = 1,6 \cdot \frac{p_z \cdot R}{2 \cdot \sigma_{dov,z} \cdot v} \quad [\text{m}] \quad (56)$$

$$s_{v,z} = 1,6 \cdot \frac{1,04 \cdot 10^6 \cdot 5}{2 \cdot 230,435 \cdot 10^6 \cdot 0,7} \quad [\text{m}]$$

$$s_{v,z} = 0,0258 \quad [\text{m}]$$

Podmínka bezpečnosti tloušťky vrchlíkového SPP při tlakové zkoušce:

$$s_{viko} > s_{v,z}$$

$0,035 > 0,0258$ tloušťka víka vyhovuje zkušebnímu přetlaku

Nejmenší tloušťka víka při tlakové zkoušce

$$s_{\text{víko},z} = s_{v,z} + c \quad [\text{m}] \quad (57)$$

$$s_{\text{víko},z} = 0,0258 + 0,002 \quad [\text{m}]$$

$$s_{\text{víko},z} = 0,0278 \quad [\text{m}]$$

Podmínka bezpečnosti vrchlíkového víka SPP:

$$s_{\text{víko}} > s_{\text{víko},z}$$

$0,035 > 0,0278$ tloušťka stěny víka vyhovuje zkušebnímu přetlaku

5.3.4 Pevnostní kontrola trubky přehříváku s vnitřním přetlakem

Výpočet tloušťky stěny trubky s vnitřním přetlakem je založen na membránové teorii válcové skořepiny velké délky. Předpokládá se, že porušení nastane vlivem obvodového napětí.

Rozsah platnosti

Ověření možnosti pevnostního výpočtu dle normy ČSN 69 0011:

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka
vnější průměr trubky	d_2	0,019	m
provedená tloušťka stěny trubky	s_t	0,0015	m

Tabulka 5-20 Hodnoty pro výpočet PK9

$$\frac{d_2}{d_2 - 2 \cdot s_t} \leq 1,3 \quad (58)$$

$$\frac{0,019}{0,019 - 2 \cdot 0,0015} \leq 1,3$$

$$1,188 \leq 1,3$$

Podmínku splňuji a následný postup výpočtu je proveden dle výše uvedené normy.

KONTROLA PRO PROVOZNÍ STAV

Volba materiálu

Trubky přehříváku jsou vyrobeny z oceli 15 121, která vyniká svou dobrou svařitelností i obrobitelností. Je určena pro bezešvé trubky a velmi namáhané konstrukce strojů. Obecně je

třída ocelí 15 legována kombinací chrómu s vanadem nebo molybdenem popř. wolframem. Používá se hlavně na vysokotlaké kotle, trubky, na součásti parních turbín a jiné komponenty namáhané za tepla, jelikož tyto oceli jsou žárovevné, tj. mají vysokou mez tečení. [22]

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
mez kluzu oceli 15 230.7	Re_{tr}	835	MPa	
součinitel bezpečnosti k mezi kluzu	x_{B1}	1,5	-	dle ČSN 69 0011

Tabulka 5-21 Hodnoty pro výpočet PK10

Dovolené namáhání

Dovolené namáhání je spočteno dle vztahu, který platí do max. výpočtové teploty +350°C, ve kterém jsou součinitelé bezpečnosti odečteny z literatury [8] pro netopenou ocelovou stěnu.

Dovolené namáhání dle meze kluzu:

$$\sigma_{dov,tr} = \frac{Re_{tr}}{x_{B1}} \quad [\text{MPa}] \quad (59)$$

$$\sigma_{dov,tr} = \frac{835}{1,5} \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_{dov,tr} = 556,667 \quad [\text{MPa}]$$

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
výpočtový přetlak	p_t	7,2	MPa	Jedná se o nejvyšší přetlak v trubce.
vnější průměr trubky	d_2	0,019	m	
dovolené namáhání	$\sigma_{dov,tr}$	556,667	MPa	
provedená tloušťka stěny	s_{trubky}	0,0015	m	
součinitel svarového spoje	v_t	1	-	Pro bezešvé trubky dle ČSN 69 0011.

Tabulka 5-22 Hodnoty pro výpočet PK11

Základní výpočtová tloušťka stěny trubky přehříváku

$$s_{04} = \frac{p_t \cdot d_2}{2 \cdot \sigma_{\text{dov, tr}} \cdot v_t + p_t} \quad [\text{m}] \quad (60)$$

$$s_{04} = \frac{7,2 \cdot 10^6 \cdot 0,019}{2 \cdot 556,667 \cdot 10^6 \cdot 1 + 7,2 \cdot 10^6} \quad [\text{m}]$$

$$s_{04} = 0,000122 \quad [\text{m}]$$

Podmínka bezpečnosti trubky:

$$s_{\text{trubky}} > s_{04}$$

$0,0015 > 0,000122$ tloušťka stěny vyhovuje výpočtovému přetlaku

KONTROLA PRO TLAKOVOU ZKOUŠKU

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
zkušební mez kluzu oceli 15 230.7	$Re_{tr,z}$	884	MPa	$t=20^\circ\text{C}$
výpočtový přetlak	p_t	7,2	MPa	Jedná se o nejvyšší přetlak v trubce.
zkušební součinitel bezpečnosti pro válcovanou ocel	x_z	1,15	-	pro Re_z při 20°C
vnější průměr trubky	d_2	0,019	m	
provedená tloušťka stěny	s_{trubky}	0,0015	m	
součinitel svarového spoje	v_t	1	-	Pro bezešvé trubky dle ČSN 69 0011

Tabulka 5-23 Hodnoty pro výpočet PK12

Zkušební přetlak

Tlaková zkouška se provádí zkušebním přetlakem p_t , který je 1,3 násobkem výpočtového přetlaku.

$$p_{t,z} = 1,3 \cdot p_t \quad [\text{MPa}] \quad (61)$$

$$p_{t,z} = 1,3 \cdot 7,2 \quad [\text{MPa}]$$

$$p_{t,z} = 9,36 \quad [\text{MPa}]$$

Zkušební dovolené namáhání trubky přihríváku

$$\sigma_{\text{dov},T-z} = \frac{Re_{tr,z}}{x_z} \quad [\text{MPa}] \quad (62)$$

$$\sigma_{\text{dov},T-z} = \frac{884}{1,15} \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_{\text{dov},T-z} = 768,696 \quad [\text{MPa}]$$

Zkušební výpočtová tloušťka stěny trubky

$$s_{tr,z} = \frac{p_{t,z} \cdot d_2}{2 \cdot \sigma_{\text{dov},T-z} \cdot v_t + p_{t,z}} \quad [\text{m}] \quad (63)$$

$$s_{tr,z} = \frac{9,36 \cdot 10^6 \cdot 0,019}{2 \cdot 768,696 \cdot 10^6 \cdot 0,7 + 9,36 \cdot 10^6} \quad [\text{m}]$$

$$s_{tr,z} = 0,000115 \quad [\text{m}]$$

Podmínka bezpečnosti trubky při tlakové zkoušce:

$$s_{\text{trubky}} > s_{tr,z}$$

0,0015 > 0,000115 tloušťka stěny trubky vyhovuje zkušebnímu přetlaku

5.3.5 Pevnostní kontrola rozváděcí trubky

Rozsah platnosti

Ověření možnosti pevnostního výpočtu dle normy ČSN 69 0011:

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka
vnější průměr rozváděcí trubky	d_3	0,120	m
provedená tloušťka stěny rozváděcí trubky	s_{RT}	0,003	m

Tabulka 5-24 Hodnoty pro výpočet PK13

$$\frac{d_3}{d_3 - 2 \cdot s_{RT}} \leq 1,3 \quad (64)$$

$$\frac{0,120}{0,120 - 2 \cdot 0,003} \leq 1,3$$

$$1,025 \leq 1,3$$

Podmínku splňují a následný postup výpočtu je proveden dle výše uvedené normy.

Návrh vertikálního separátoru a přihríváče páry pro jadernou elektrárnu MIR 1200

KONTROLA PRO PROVOZNÍ STAV

Volba materiálu

Materiál volím stejný jako je tomu i u trubek přehříváku, tudíž ocel 15 230.7. Parametry uvedené oceli viz kap. 5.3.4.

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
dovolené namáhání	$\sigma_{\text{dov,tr}}$	556,667	MPa	dle rovnice č. 59
výpočtový přetlak	p_t	7,2	MPa	Jedná se o nejvyšší přetlak v trubce.
součinitel svarového spoje	v_t	1	-	Pro bezešvé trubky dle ČSN 69 0011
vnější průměr trubky	d_3	0,120	m	

Tabulka 5-25 Hodnoty pro výpočet PK14

Základní výpočtová tloušťka stěny trubky přehříváku

$$s_{05} = \frac{p_t \cdot d_3}{2 \cdot \sigma_{\text{dov,tr}} \cdot v_t + p_t} \quad [\text{m}] \quad (65)$$

$$s_{05} = \frac{7,2 \cdot 10^6 \cdot 0,120}{2 \cdot 556,667 \cdot 10^6 \cdot 1 + 7,2 \cdot 10^6} \quad [\text{m}]$$

$$s_{05} = 0,000771 \quad [\text{m}]$$

Podmínka bezpečnosti trubky:

$$s_{\text{RT}} > s_{05}$$

0,003 > 0,000771 tloušťka stěny vyhovuje výpočtovému přetlaku

KONTROLA PRO TLAKOVOU ZKOUŠKU

Hodnoty potřebné pro výpočet

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka	Poznámka
zkušební přetlak	$p_{t,z}$	9,36	MPa	dle rovnice č. 61
zkušební dovolené namáhání	$\sigma_{\text{dov,T-z}}$	768,696	MPa	dle rovnice č. 62
vnější průměr trubky	d_3	0,120	m	
provedená tloušťka stěny trubky	s_{RT}	0,003	m	
součinitel svarového spoje	v_t	1	-	Pro bezešvé trubky dle ČSN 69 0011

Tabulka 5-26 Hodnoty pro výpočet PK15

Zkušební výpočtová tloušťka stěny trubky

$$s_{RT,z} = \frac{p_{t,z} \cdot d_3}{2 \cdot \sigma_{dov,T-z} \cdot v_t + p_{t,z}} \quad [m] \quad (66)$$

$$s_{RT,z} = \frac{9,36 \cdot 10^6 \cdot 0,120}{2 \cdot 768,696 \cdot 10^6 \cdot 1 + 9,36 \cdot 10^6} \quad [m]$$

$$s_{RT,z} = 0,000726 \quad [m]$$

Podmínka bezpečnosti trubky při tlakové zkoušce:

$$s_{RT} > s_{RT,z}$$

$0,003 > 0,000726$ tloušťka stěny trubky vyhovuje zkušebnímu přetlaku

6 Závěr

Návrh vertikálního separátoru a přehříváku páry vychází ze zadání diplomové práce. V rámci výpočtu uvažuji 2 samostatná zařízení SPP pro jednu turbínu.

Každý ze SPP je proveden v rámci jedné vertikální válcové nádoby. Mokrá pára vstupuje ve spodní části, ve které jsou umístěny 3 sekce žaluziových separátorů rozmístěných do tvaru hvězdy. Výpočtová separační plocha činí $28,6\text{m}^2$, přičemž jednotlivé žaluzie jsou od sebe vzdáleny $0,01\text{m}$ z důvodu zabránění strhávání vodního filmu zpět do páry. Odvod kondenzátu je zajištěn pomocí plechů umístěných pod sekcemi separátoru a odtud odchází potrubím mimo zařízení.

Při výstupu páry ze separátoru zajišťují děrované plechy její rovnoměrný vstup do přehříváku. Zde médium prostupuje diagonálně přes 6 kruhově uspořádaných svazků. Každý element je tvořen 899 trubkami, ve kterých proudí topná pára. K přestupu tepla dochází vlivem kondenzace topné páry a předání jejího latentního výparného tepla stěnou trubek přehřívané páře. Kondenzát pokračuje vodními kanály do kruhového prstence a odtud ven z nádoby. Přehřátá pára na výstupu z přehříváku je vedena do NT dílu turbíny.

Pevnostní kontrola byla provedena na plášť SPP, vrchlíkové víko, dno, trubky přehříváku a rozváděcí trubku. Po pevnostní stránce navrhované materiály vyhovují zatížení, které může na těchto komponentech nastat během provozu.

Plášť SPP je svařen z oceli 13 123.5, která disponuje dobrými vlastnostmi při zvýšených tlacích i teplotách. Jedná se zároveň o levnou náhradu oceli s dominujícím legujícím prvkem manganem místo dražšího niklu. Všechna potrubí v navrhovaném zařízení jsou vyrobena ze žárupevné oceli 15 121 určené pro bezešvé trubky.

7 Použitá literatura

- [1] KREJČÍ, František. S KOL. *Vstupní školení do jaderné elektrárny Temelín*. Praha, 2010. ISBN 907002100.
- [2] *Sborník přednášek pro letní univerzitu*. Temelín, 2011.
- [3] *Energie bez kouře: Jaderná energie*. Praha: ČEZ a.s., 2009.
- [4] HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Praha: ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03190-X.
- [5] JÁN, Zvara. *Separátory a prihrievače pary pre jadrové elektrárne*. Bratislava: Edičné stredisko SVŠT, 1976.
- [6] RAJČOK, Matúš a Branislav BÖHMER. *Stroje a zariadenia JE*. Bratislava: Edičné stredisko SVTŠT.
- [7] BALCKE-DÜRR GMBH. *Moisture Separator Reheater* [online]. Ratingen, Germany: Balcke Dür AN SPX company, 2009 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: http://www.balcke-duerr.com/index_en.php?level=3&CatID=30.35.76&inhalt_id=1021&download_CatID=70
- [8] BRUSCKMANN, W. a M. KIENBÖCK. *Moisture Separator Reheater A60e* [online]. Wenden, Germany: Balcke Dür AN SPX company, 2009 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: http://www.balcke-duerr.com/index_en.php?level=3&CatID=30.35.76&inhalt_id=1021&download_CatID=70
- [9] ČERNÝ, Václav, Jan KARTÁK, František JIROUŠ a Bronislav MARVAN. *Základy konstruování kotlů a parogenerátorů jaderných elektráren*. Praha: ČVUT, 1974. ISBN 179802.
- [10] WISCHNEWSKI, Berndt. *Program CalcSteam*. Berlin, Germany. Dostupné z: http://www.peacesoftware.de/apps/steam_e.html
- [11] SpiraxSarco.[online].[cit.2013-01-22].Dostupné z: <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-tables.asp>
- [12] *Modelování separace*. Ostrava, 1987. Studenská vědecká práce. VŠB Ostrava.

- [13] BLAHOŽ, Vladimír a Zdeněk KADLEC. *Základy sdílení tepla*. 2. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2000, 109 s. ISBN 80-902-0011-7.
- [14] KADLEC, Zdeněk. *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009, 100 s. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-061-6.
- [15] KADLEC, Zdeněk. *Termomechanika: návody do cvičení*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 97 s. ISBN 978-80-248-1736-1.
- [16] KOLAT, Pavel. *Přenos tepla a hmoty*. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Strojní fakulta, 1986, 266s.
- [17] ČSN 69 0010. *Tlakové nádoby stabilní*. Praha: Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1968.
- [18] ČSN 69 0011. *Pevnostní výpočet částí tlakových nádob*. Praha: Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1968.
- [19] <http://www.transformacni-technologie.cz/jaderna-energetika.html#80>
- [20] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. Praha: SNTL, 1983.
- [21] *Převodní tabulky* [online]. [cit. 2013-01-24] Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/prevodni-tabulky-oceli/#oceli>
- [22] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008, xiv, 914s. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [23] KUTATELADZE, S.S. a V.M. BORISANSKIJ. *Příručka sdílení tepla*. Praha. SNTL 1962.

8 Seznam příloh

Příloha A – Separátor a přehříváč páry

Příloha B – CD s DP a výpočtem v programu Excel